



Журнал включен в базы данных

Web of Science Core Collection; Emerging Sources Citation Index (ESCI);
Directory of Open Access Journals (DOAJ)

The Journal is included in the following databases:

Web of Science Core Collection; Emerging Sources Citation Index (ESCI);
Directory of Open Access Journals (DOAJ)

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство

Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н., Яглов В. Н. Процессы, протекающие на поверхности бетонных покрытий при их химической защите от зимней скользкости	265
Марко О. Ю., Батыновский Э. И. Кинетика твердения бетона с наноуглеродной добавкой УКД-1 в варианте беспрогревной тех- нологии	271
Леонович С. Н., Свиридов Д. В., Щукин Г. Л., Беланович А. Л., Савенко В. П., Карпушенко С. А. Влияние цитрата натрия на процесс формирования цементного камня в глиноземистом вяжущем	281
Климков В. Т. Использование фильтров из волокнистых мате- риалов в мелиоративном и гидротехническом строительстве.	287
Богославчик П. М., Круглов Г. Г., Линкевич Н. Н. Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий»	292
Пшембаев М. К., Гиринский В. В., Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Будниченко С. С. Поровая структура дорожного бетона	298

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N. Processes Proceeding on Concrete Coating Surfaces in Case of their Chemical Protection against Winter Slipperiness	265
Marko O. Yu., Batyanovsky E. I. Curing Kinetics of Concrete with UKD-1-Nanocarbon Additive in Version of Non Warm-Up Technology	271
Leonovich S. N., Sviridov D. V., Shchukin G. L., Belanovich A. L., Savenko V. P., Karpushenkov S. A. Sodium Citrate Influence on Formation of Cement Stone in the Aluminous Binder	281
Klimkov V. T. Usage of Filters from Fibrous Materials in Ameliorative and Hydro-Technical Construction	287
Bohaslauchyk P. M., Kruglou G. G., Linkevich N. N. Assessment of Reliability and Risk Degree for Accident Initiation at Slime Storages of 4 th Mining Administration, JSC "Belaruskali" ...	292
Pshembaev M. K., Girinsky V. V., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Budnichenko S. S. Porous Structure of Road Concrete	298

Садин Э. Я. Расчетная оценка анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь	308
Юсеф Даниаль Современные курортные гостиницы Сирии: характер архитектуры и возможности для инновационной деятельности	315

Sadin E. Ya. Calculation Assessment of Anchorage in Concrete for Fiberglass Reinforcement Manufactured in the Republic of Belarus	308
Yuosef Danial Modern Resort Hotels in Syria: Architecture Features and Conditions for Innovation	315

Электронные системы

Лобатый А. А., Петренко, Ю. Н. Аймад Эльзейн, Абуфанас А. С. Математическое моделирование гибридных электротехнических систем	322
Солодуха В. А., Белоус А. И., Чигирь Г. Г. Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии	329
Гулай А. В., Зайцев В. М. Анализ информационных факторов в проектировании интеллектуальных мехатронных систем	335
Соколов А. В. Регулярный метод синтеза базовых бент-квадратов произвольного порядка.	345

Electronic Systems

Lobaty A. A., Petrenko Yu. N., Imad Elzein, Abufanas A. S. Mathematical Modeling of Hybrid Electrical Engineering Systems	322
Solodukha V. A., Beloy A. I., Chyhir G. G. Depth Measurement of Disrupted Layer on Silicon Wafer Surface Using Auger Spectroscopy Method	329
Gulai A. V., Zaytzev V. M. Analysis of Information Factors for Designing Intellectual Mechatronic System	335
Sokolov A. V. Regular Method for Synthesis of Basic Bent-Squares of Random Order	345

Редакционная коллегия

<i>В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный техни- ческий университет, Минск, Республика Бела- русь),</i>
<i>В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный техни- ческий университет, Минск, Республика Бела- русь),</i>
<i>А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт На- циональной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),</i>
<i>В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный техни- ческий университет, Минск, Республика Бела- русь),</i>
<i>С. В. БОСАКОВ (Научно-исследовательское РУП по строительству «Институт БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),</i>
<i>Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный техни- ческий университет, Минск, Республика Бела- русь),</i>
<i>О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный техни- ческий университет, Минск, Республика Бела- русь),</i>
<i>К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный техни- ческий университет, Минск, Республика Бела- русь),</i>

Editorial Board

<i>V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical Uni- versity, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>A. V. BELYI (Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>V. P. BOIKOV (Belarusian National Technical Univer- sity, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific- Research Enterprise for Construction “Institute BelNIIS”, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical Uni- versity, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical Uni- versity, Minsk, Republic of Belarus),</i>

П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 М. З. ЗГУРОВСКИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
 Р. Б. ИВУТЬ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
 М. Г. КИСЕЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Я. Н. КОВАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 В. В. КОЗЛОВСКИЙ (Минский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
 В. М. КОНСТАНТИНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Н. В. КУЛЕШОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 С. Н. ЛЕОНОВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 С. А. МАСКЕВИЧ (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
 Э. И. МИХНЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 НГУЕН ТХУ НГА (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
 М. ОПЕЛЯК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
 О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
 Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),

P. I. DIACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 M. Z. ZGUROVSKY (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
 R. B. IVUT (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
 M. G. KISELEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 Ya. N. KOVALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 V. V. KOZLOVSKY (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
 V. M. KONSTANTINOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 N. V. KULESHOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. N. LEONOVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. A. MASKEVICH (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
 E. I. MIKHNEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 NGUYEN THUY NGA (Institute of Energy Science of Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
 M. OPIELAK (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
 O. G. PENIAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
 G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 O. P. REUT (Branch of the BNTU “Institute of Improvement of Professional Skills and Staff Retraining on New Directions of Engineering, Technology and Economy”, Minsk, Republic of Belarus),

Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 В. Л. СОЛОМАХО (Республиканский институт инновационных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь),
 С. А. ЧИЖИК (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
 А. Н. ЧИЧКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),
 Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 I. I. SERGEI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 V. L. SOLOMAKHO (Republican Institute of Innovative Technologies of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. A. CHIZHIK (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National of Academy Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
 A. N. CHICHKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),
 B. A. YAKIMOVICH (Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
 пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
 220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

Address

Belarusian National Technical University
 Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
 220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 05.07.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-265–270

УДК 625.768.6

Процессы, протекающие на поверхности бетонных покрытий при их химической защите от зимней скользкости

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾,
докт. хим. наук, проф. В. Н. Яглов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Бетонные покрытия автомобильных дорог наряду с эксплуатационными нагрузками, обусловленными движением транспортных средств, подвергаются погоднo-климатическим воздействиям. К ним относятся: изменения температуры и влажности воздуха, солнечная радиация, приземная скорость ветра, участвующая в формировании активного теплообмена в поверхностном слое бетонного покрытия. Одними из самых сложных и ответственных эксплуатационных периодов работы дорог являются так называемые переходные (от лета к осени и от зимы к весне). Они сопровождаются интенсивным выпадением осадков в виде дождя, снега и возможным образованием гололедных отложений на поверхности цементобетонных покрытий. Эти воздействия существенно ухудшают фрикционные свойства поверхностей дорожного покрытия (коэффициент сцепления ϕ снижается до 0,4 и менее), что может явиться предпосылкой к созданию различных аварийных ситуаций из-за резкого увеличения тормозного пути. Например, при сухом бетонном покрытии $\phi = 0,80\text{--}0,85$, а при гололеде $\phi = 0,08\text{--}0,15$, что соответственно увеличивает тормозной путь от 7,5 до 20,0 м и более. В условиях зимней эксплуатации автомобильных дорог с бетонным покрытием на их поверхности возможно образование слоя льда. Для его удаления применяют различные методы, в том числе химические антигололедные реагенты, в частности хлорид натрия NaCl. Этот реагент понижает температуру замерзания образующегося рассола и вызывает таяние льда при отрицательной температуре. Процессы растворения NaCl и плавление льда носят эндотермический характер, т. е. сопровождаются поглощением теплоты, вследствие чего в поверхностном слое бетонного покрытия, находящегося под тающим льдом, резко снижается температура: наблюдается явление термического удара.

Ключевые слова: автомобильная дорога, зимнее содержание, антигололедные реагенты, термический удар

Для цитирования: Пшембаев, М. К. Процессы, протекающие на поверхности бетонных покрытий при их химической защите от зимней скользкости / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев, В. Н. Яглов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 265–270

Processes Proceeding on Concrete Coating Surfaces in Case of their Chemical Protection against Winter Slipperiness

М. К. Pshembaev¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾, V. N. Yaglov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Concrete coatings of road traffic highways along with operational loadings caused by flow of traffic are subjected to weather and climate impacts. These are the following impacts: changes in temperature and air humidity, solar radiation,

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

surface wind speed which is participating in formation of active heat-and-mass transfer in a surface layer of the concrete coating. One of the most complicated and important periods in the road traffic highway operation is so called transitional nature period (from Summer to Autumn and from Winter to Spring). These periods are accompanied by intensive rain and snow fall and possible formation of ice loading on the surface of cement and concrete coatings. These impacts significantly deteriorate friction properties of road pavement (friction factor φ is decreased up to 0.4 and less) that can be a prerequisite to creation of various accident situations due to sharp increase in braking distance. For example, while having dry pavement the friction factor φ is equal to 0.80–0.85, and during icy condition of the road the factor φ constitutes 0.08–0.15 that consequently entails an increase in braking distance from 7.5 up to 20.0 m and more. It is quite possible that ice layer appears on the surface of concrete coatings when road traffic highways are used in winter season. Various methods are applicable to remove ice from the surface they can include also ice-melting chemicals and sodium chloride NaCl in particular. The chemical decreases freezing temperature of the formed brine and causes ice melting at negative temperature. Processes of NaCl dissolution and ice melting have an endothermic character, in other words these processes are accompanied by heat ingress and due to it temperature is sharply decreasing in the surface layer of the concrete coating which is under the melting ice and in this case phenomenon of thermal shock is observed.

Keywords: road traffic highway, winter maintenance, ice-melting chemicals, thermal shock

For citation: Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N. (2016) Processes Proceeding on Concrete Coating Surfaces in Case of their Chemical Protection against Winter Slipperiness. *Science & Technique*. 15 (4), 265–270 (in Russian)

Введение

Основная задача зимнего содержания автомобильных дорог общего пользования – проведение комплекса мероприятий по обеспечению безопасного и бесперебойного движения на автомобильной дороге в зимний период, в том числе защита автомобильных дорог от снежных заносов и очистка их от снега, устранение зимней скользкости. Решение этих задач достигается путем проведения различных видов работ по зимнему содержанию дорог, в том числе использованием антигололедных реагентов (АГР) [1–7].

Экспериментальные исследования

В [8] приведены результаты исследований явления термического удара, выполненных в МИСИ на установке Всесоюзного НИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Испытаниям подвергали образцы песчаного бетона с В/Ц = 0,44. Использовали портландцемент марки М400 и кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,59$. Изготавливали образцы бетона размерами 7,07×7,07×7,07 см, которые твердели на начальном этапе в условиях пропаривания с последующим твердением при нормальных условиях в течение 28 сут. Циклы замораживания образцов осуществляли в морозильной камере при воздействии жидкого азота. Для образования слоя льда на поверхности образцов по периметру устанавливали водонепроницаемый

борт, а поверхность образцов закрывали листом полиэтилена, исключая непосредственный контакт бетона с NaCl.

Для измерения температуры в каждый образец монтировались четыре хромель-копелевые термопары: на поверхности и на глубинах 0,5; 1,5 и 3,5 см. Термопары устанавливались параллельно горизонтальной поверхности образца и доходили до его середины. Величины измерения температур во времени фиксировались потенциометром.

Зависимости изменения температуры в поверхностном слое бетонного покрытия при нанесении соли на лед, покрывающий эту поверхность, представлены на рис. 1.

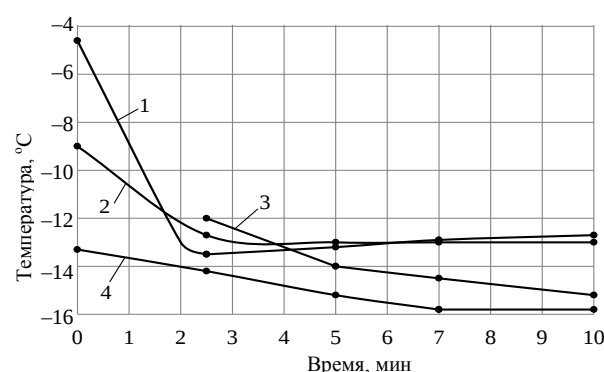


Рис. 1. Изменения температуры бетонного покрытия при термическом ударе [8]: 1 – на поверхности; 2, 3, 4 – на глубине 0,5; 1,5 и 3,5 см соответственно. Толщина слоя льда 1–2 см при расходе соли 10–20 г

Fig. 1. Changes in temperature of concrete coating during thermal shock [8]: 1 – on surface; 2, 3, 4 – at depth 0.5; 1.5 and 3.5 cm, respectively. Ice layer thickness 1–2 cm with salt consumption of 10–20 g

Анализ кривых на рис. 1 показал, что скорость снижения температуры на поверхности бетона после нанесения АГР составляет 9,5 град./мин в течение первых двух минут и 1,0–4,0 град./мин – в глубине образца бетона (табл. 1).

Таблица 1

**Градиенты температур бетона
после нанесения антигололедного реагента [8]**

**Concrete temperature gradients
after using ice-melting chemical [IMC] [8]**

Глубина установки термопары, см	Диапазон изменения температуры бетона, °С	Градиент температуры в слое, °С/мин
На поверхности бетона	От –4,0 до –13,5	9,5
–0,5	От –9,0 до –13,0	4,0
–1,5	От –10,0 до –14,0	4,0
–3,5	От –13,0 до –14,0	1,0

Анализ методики проведения экспериментов, изложенной в [3], показал, что при применении АГР в виде NaCl установлен факт появления термического удара в поверхностном слое бетонных покрытий. Однако при этом можно отметить следующие особенности, которые не позволяют полученные экспериментальные результаты использовать применительно к защите дорожных цементобетонных покрытий от солевой коррозии во время зимнего содержания дорог. В этом аспекте можно сформулировать следующие замечания:

- при проведении эксперимента использовался не дорожный бетон, а песчаные образцы с цементом М400 неизвестного минералогического состава;

- образцы бетона твердели в условиях пропаривания, что не соответствует фактическим условиям твердения бетона при устройстве дорожных покрытий.

Можно сделать следующий общий вывод по результатам [8]:

- учитывая отмеченные принципиальные замечания, следует выполнить исследования по изучению влияния термического удара на поверхностное деформирование бетонных покрытий. В частности, использованная в [3] методика моделирования термического удара весьма условна: поверхность бетонных покрытий «удалена» от непосредственного воздействия NaCl

искусственной преградой (полиэтиленовой пленкой), что не соответствует фактическому контакту NaCl с бетонным покрытием;

- для теоретического обоснования эффективности применения химических АГР необходимо провести анализ процессов, протекающих на поверхности бетонных покрытий при использовании химических средств защиты от зимней скользкости.

Механизм физико-химических процессов, сопровождающих явление термического удара

Как уже отмечалось, наиболее радикальным способом борьбы с гололедом является применение химических АГР, которые понижают температуру плавления льда. При снежной погоде с оттепелями реагенты чаще используют в твердом виде, а в сухую погоду и при гололеде – в жидком.

При попадании твердых кристаллических АГР на поверхность льда или снега их кристаллы начинают активно поглощать влагу из окружающей среды. АГР NaCl гигроскопичен. На поверхности кристалла NaCl образуется тонкая пленка воды, в которой начинает растворяться снег или лед, образуя раствор NaCl. При растворении электролита давление пара воды над таким раствором уменьшается, что вызывает понижение температуры замерзания раствора ($\Delta t_{\text{зам}}$) по сравнению с чистой водой (закон Рауля) [9]

$$\Delta t_{\text{зам}} = ik \frac{m_{\text{в}} \cdot 1000}{M_{\text{в}} m_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (1)$$

где i – изотонический коэффициент, показывающий превышение числа частиц в растворе электролита (ионов и их ассоциатов) по сравнению с числом молекул неэлектролита такой же концентрации. У разбавленных растворов электролитов значение величины i близко к числу ионов, на которые диссоциирует одна молекула электролита (для NaCl = $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ $i \approx 2$); k – криоскопическая константа воды (1,86 кг·К/моль); $m_{\text{в}}$ – масса АГР, г; $M_{\text{в}}$ – молекулярная масса АГР, г/моль; $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса воды, г.

Поскольку $\Delta t_{\text{зам}} = t_{\text{зам. H}_2\text{O}} - t_{\text{зам. п-ра}}$ и $t_{\text{зам. H}_2\text{O}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, то

$$t_{\text{зам.р-ра}} = t_{\text{зам.Н}_2\text{О}} - \Delta t_{\text{зам}} = -\Delta t_{\text{зам}} \quad (2)$$

То есть любой раствор электролита замерзает при температуре ниже 0 °С. Процесс растворения NaCl в воде снижает температуру замерзания раствора и является эндотермическим процессом. Суммарный тепловой эффект растворения соли NaCl складывается из трех видов:

- теплового эффекта (эндоэффект) разрушения кристаллической решетки NaCl ($\Delta_{\text{разр}}\text{H}^\circ$ (289 K));
- теплового эффекта гидратации образовавшихся ионов Na^+ и Cl^- ($\Delta_{\text{гидрат}}\text{H}^\circ$ (289 K));
- теплового эффекта диффузии гидратированных ионов в растворе ($\Delta_{\text{диф}}\text{H}^\circ$ (289 K)).

Таким образом, суммарный тепловой эффект растворения соли выражается равенством

$$\Delta_{\text{раств}}\text{H}^\circ (289 \text{ K}) = \Delta_{\text{разр}}\text{H}^\circ (289 \text{ K}) + \Delta_{\text{гидрат}}\text{H}^\circ (289 \text{ K}) + \Delta_{\text{диф}}\text{H}^\circ (289 \text{ K}). \quad (3)$$

Величина $\Delta_{\text{диф}}\text{H}^\circ$ (289 K) по сравнению с первыми двумя эффектами мала, и ею можно пренебречь. Однако для разных солей остальные эффекты имеют некоторые особенности. Так, при растворении CaCl_2 величина $\Delta_{\text{гидрат}}\text{H}^\circ$ (289 K) > $\Delta_{\text{разр}}\text{H}^\circ$ (289 K) и тепловой эффект растворения будет экзотермическим ($\Delta_{\text{раств}}\text{H}^\circ$ (289 K) = -75,6 кДж/моль). Для NaCl $\Delta_{\text{разр}}\text{H}^\circ$ (289 K) > $\Delta_{\text{гидрат}}\text{H}^\circ$ (289 K) и суммарный эффект будет эндотермическим, т. е. $\Delta_{\text{раств}}\text{H}^\circ$ (289 K) = +5,1 кДж/моль. При этом следует учитывать, что плавление льда также сопровождается поглощением энергии ($\Delta_{\text{пл}}\text{H}^\circ$ (289 K) = +5,97 кДж/моль).

Тепловая энергия, необходимая для растворения химических реагентов (например, NaCl) и плавления льда, берется из окружающей среды, в том числе из поверхностного слоя бетонного покрытия автомобильной дороги, что и вызывает снижение его температуры (в некоторых случаях импульсно-резкое, в виде термического удара).

Скорость таяния льда и снега на дорожном покрытии зависит от скорости растворения солей (АГР) и эвтектической температуры образования соляного раствора. Эвтектические температуры для растворов некоторых солей приведены в табл. 2.

Температура замерзания раствора зависит от его концентрации. Понижение температуры замерзания раствора наблюдается до достижения раствором точки эвтектики. При понижении температуры первым кристаллизуется чистый растворитель (H_2O), т. е. выделяются кристаллы льда и, следовательно, концентрация соли в растворе повышается, а температура его замерзания понижается (1). Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута эвтектическая температура (табл. 2). В момент достижения температуры эвтектики совместно с кристаллами льда начинают выделяться кристаллы соли, т. е. концентрация раствора падает, а его температура замерзания повышается. Таким образом, получившийся в этом процессе раствор NaCl может снова замерзнуть, вызывая дополнительную скользкость покрытия. Поэтому на практике NaCl можно использовать не до температуры эвтектики, а при температуре воздуха не ниже ~12 °С.

Молекула CaCl_2 при растворении присоединяет шесть молекул воды, образуя кристаллогидрат $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Этот процесс сопровождается выделением 73,7 кДж теплоты, но при растворении одного моля $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ поглощается 18 кДж теплоты. Поэтому использование CaCl_2 для борьбы с зимней скользкостью ограничивается не эвтектической температурой (-50,1) °С, а рабочей, которая составляет (-34,0) °С.

Как отмечалось, процесс растворения кристаллов NaCl протекает медленно, с поглощением теплоты ($\Delta_{\text{раств}}\text{H}^\circ$ (289 K) = +5,1 кДж/моль), а кристаллов CaCl_2 – быстро, с выделением теплоты ($\Delta_{\text{раств}}\text{H}^\circ$ (289 K) = -75,6 кДж/моль). Это происходит потому, что кристаллы гигроскопической соли, помещенные на сухой поверхности покрытия дороги, накапливают влагу на своей поверхности из окружающей атмосферы до тех пор, пока на поверхности кристалла не образуется тонкая пленка соляного раствора. Образовавшаяся пленка раствора активизирует растворение оставшихся («нетронутых») кристаллов соли. Кристаллы NaCl начинают адсорбировать влагу при относительной влажности воздуха 76 % и более, а кристаллы CaCl_2 адсорбируют влагу уже при влажности воздуха 42 %.

Таблица 2

Эвтектические температуры растворов солей

Eutectic temperature of salt solutions

Вид соли, ее концентрация в растворе, %	NaCl, 23,3	CaCl ₂ , 29,6	MgCl ₂ , 22,1	KCl, 19,7	CH ₃ COOH, 50,0
$T_{эвт}, ^\circ\text{C}$	-21,2	-50,1	-35,5	-10,7	-60

Под действием собственной массы и при относительно малой скорости растворения гранулы NaCl проникают через слой льда на поверхность дорожного покрытия (рис. 2), что ослабляет адгезионную связь $F_{ад}$ между поверхностью бетонного покрытия и слоем льда.

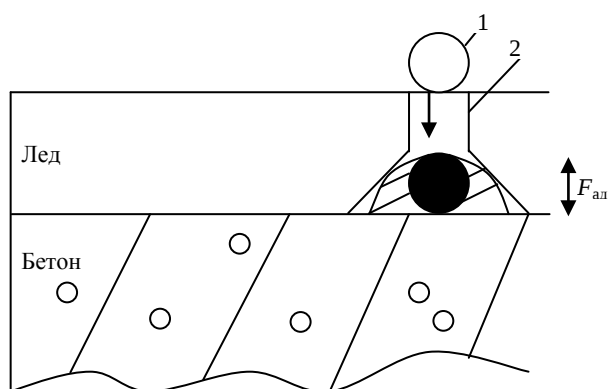


Рис. 2. Схема взаимодействия антигололедного реагента с поверхностью бетонного покрытия:

$F_{ад}$ – сила адгезии на межфазной границе систем «лед – бетон»; 1 – кристаллическая частица NaCl; 2 – поровый канал в слое льда после диффузного проникновения в него кристалла NaCl

Fig. 2. Scheme of ice-melting chemical [IMC] interaction with the surface of concrete coating:

$F_{ад}$ – adhesion force at interphase boundary of the “ice – concrete” system; 1 – crystalline particle NaCl; 2 – porous channel in ice layer after diffusion penetration of crystal NaCl in it

Раствор NaCl, образующийся в слое льда, растекается по поровым каналам по поверхности бетонного покрытия и отслаивает от него ледяной слой. В некоторых случаях, когда необходимо быстро ликвидировать зимнюю скользкость при температуре воздуха ниже минус 15 °С, рекомендуется применять соль CaCl₂. Однако этот АГР является дорогостоящим и дефицитным продуктом и его применение целесообразно лишь в исключительных ситуациях.

В этой связи представляет интерес анализ процесса растворения CaCl₂. Он происходит

с гораздо большей скоростью по сравнению с процессом растворения NaCl. Причина этого описана выше. Гранулы CaCl₂ адсорбируют воду до тех пор, пока не растворятся полностью. При этом образующийся раствор CaCl₂ продолжит адсорбировать влагу, пока не будет достигнуто равновесие между упругостью воды над раствором и упругостью паров воды в воздухе. Такое явление во многом объясняется активностью воды a_w

$$a_w = \frac{p_w}{p_0} = \frac{p_{0в}}{100}, \quad (4)$$

где p_w – давление паров воды над объектом; p_0 – то же над чистой водой при той же температуре; $p_{0в}$ – относительная влажность воздуха в состоянии равновесия, при котором материал не впитывает влагу и не теряет ее в атмосферу.

Отношение (4) входит в основную термодинамическую формулу определения энергии связи влаги (H₂O) с материалом [10]

$$\Delta F = RT \ln \frac{p_w}{p_0} = -RT \ln a_w, \quad (5)$$

где ΔF – уменьшение свободной энергии (при постоянной температуре); R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

В случае если влажность воздуха будет повышаться, то раствор CaCl₂ адсорбирует влаги больше. Если же влажность воздуха понизится, то часть воды из раствора CaCl₂ перейдет в пар. Поэтому важно знать фактическую влажность воздуха при использовании CaCl₂.

ВЫВОД

Из приведенных данных следует, что в случае использования некоторых антигололедных реагентов в поверхностном слое дороги на глубинах 0,5–3,5 см возникают значительные температурные градиенты (термический удар).

При этом возможно замерзание воды в мелких порах поверхностного слоя бетона, приводящее к существенному повышению его льдистости. В результате, как следствие, образуются температурные напряжения, приводящие к деформациям структуры поверхностного слоя бетона и его ускоренному разрушению (шелушению). Развитию поверхностных разрушений бетонных покрытий способствует также истирающее и динамическое воздействие колесных нагрузок тяжелого грузового транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. М.: Госстройиздат, 1979. 344 с.
2. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]; под ред. Ф. М. Иванова. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
3. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф. М. Иванов. М.: Транспорт, 1968. 175 с.
4. Шейкин, А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А. Е. Шейкин, Л. И. Добшиц. Л.: Стройиздат. Ленинградское отд., 1989. 128 с.
5. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками. М.: Стройиздат, 1978. 80 с.
6. Райхель, В. Бетон / В. Райхель, Д. Конрад; пер. с нем. О. П. Мчедлова-Петросяна. М.: Стройиздат, 1979. Ч. 1: Свойства. Проектирование. Испытание. 109 с.
7. Wurth, E. Beanspruchung des Betons Bei Tausalanzanwendung / E. Wurth // Betonwerk + Fertigteil Technik. 1977. No 11. P. 542–548.
8. Баландина, И. В. О влиянии термического удара на разрушение дорожного бетона / И. В. Баландина // Измерения физико-механических свойств и характеристик структур строительных материалов: сб. науч. тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиотехн. измерений. М., 1981. С. 78–80.
9. Новиков, Г. И. Основы общей химии / Г. И. Новиков. М.: Высш. шк., 1988. 431 с.

10. Николаев, Л. А. Физическая химия / Л. А. Николаев, В. А. Тулупов. М.: Высш. шк., 1966. 461 с.

Поступила 16.02.2016

Подписана в печать 18.04.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Shejkin A. E., Chehovskij Yu. V., Brusser M. I. (1979) *Structure and Properties of Cement Concrete*. Moscow, Gosstroyizdat. 344 (in Russian).
2. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl' P. (1990) *Life-Span of Reinforced Concrete in Corrosive Environment*. Moscow, Stroyizdat. 320 (in Russian).
3. Ivanov F. M. (1968) *Protection of Concrete Transport Works against Corrosion*. Moscow, Transport. 175 (in Russian).
4. Shejkin A. E., Dobshits L. I. (1989) *Cement Concrete of High Frost Resistance*. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad Branch. 128 (in Russian).
5. *Guidance on Application of Concrete with Antifreeze Agents*. Moscow, Stroyizdat, 1978. 80 (in Russian).
6. Reichel W., Conrad D. (1976) Beton. Band 1. Eigenschaften. Projektierung. Prufung. Berlin, VEB Verlag fur Bauwesen. 295 (Russ. ed.: Reichel W., Conrad D. (1979) Beton. Ch. 1.: Svoistva. Proektirovanie. Ispytanie. Moscow, Stroyizdat. 109).
7. Wurth E. (1977) Beanspruchung des Betons Bei Tausalanzanwendung. *Betonwerk + Fertigteil Technik*, (11), 542–548 (in German).
8. Balandina I. V. (1981) About Influence of Thermal Shock on Road Concrete Deterioration. *Izmereniia Fiziko-Mekhanicheskikh Svoistv i Kharakteristik Struktur Stroitelnykh Materialov: Sb. Nauch. Tr. Vsesoiuz. NII Fiz.-Tekhn. i Radiotekhn. Izmerenii* [Measurement of Physical and Mechanical Properties and Characteristics of Construction Material Structures: Collection of Scientific Papers of All-Union Scientific-Research Institute of Physical, Technical and Radio-Technical Measurements]. Moscow, 78–80 (in Russian).
9. Novikov G. I. (1988) *Fundamentals of General Chemistry*. Moscow, Vysshaya Shkola. 431 (in Russian).
10. Nikolayev L. A., Tulupov V. A. (1966) *Physical Chemistry*. Moscow, Vysshaya Shkola, 461 (in Russian).

Received: 16.02.2016

Accepted: 18.04.2014

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-271–280

УДК 666:941; 693.54

Кинетика твердения бетона с наноуглеродной добавкой УКД-1 в варианте беспрогревной технологии

Асп. О. Ю. Марко¹⁾, докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский²⁾

¹⁾Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Изложены результаты исследований влияния отечественной комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал и характеризующейся совмещенным (ускоряющим твердение и пластифицирующим) эффектом на кинетику твердения бетона в беспрогревном варианте технологии монолитного бетонирования. С использованием стандартизированных и оригинальных методик экспериментально выявлены закономерности роста прочности тяжелого цементного бетона под влиянием отдельно взятого ускоряющего компонента добавки УКД-1 и самой этой добавки в зависимости от ее дозировки (в диапазоне 0,5–2,0 % от массы цемента). Оценены зависимости темпа роста бетона с добавкой УКД-1 от основных технологических факторов – качества цемента, величины водоцементного отношения, состава бетона и консистенции бетонной смеси, температуры среды твердения и теплоизолирующих характеристик форм-опалубок. Это позволило обосновать рациональные режимы и параметры условий твердения бетона с добавкой УКД-1 для обеспечения прочности (на сжатие) в диапазоне 50–100 % от требуемой в проектном возрасте (28 сут.) без затрат энергии на ускорение его твердения.

Ключевые слова: бетон, кинетика твердения, наноуглеродная добавка УКД-1, беспрогревная технология

Для цитирования: Марко, О. Ю. Кинетика твердения бетона с наноуглеродной добавкой УКД-1 в варианте беспрогревной технологии / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 271–280

Curing Kinetics of Concrete with UKD-1-Nanocarbon Additive in Version of Non Warm-Up Technology

О. Yu. Marko¹⁾, E. I. Batyanovsky²⁾

¹⁾Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents results of investigations on influence of domestic complex chemical additive containing structured carbon nanomaterial and characterized by combined (curing acceleration and plasticizing) effect on concrete curing kinetics in non warm-up version of monolithic concreting technology. Standardized and original methods have revealed experimentally regularities in increase of strength for heavy cement concrete under the influence of specific accelerating UKD-1 additive component and the additive itself according to its dosage (within the range of 0.5–2.0 % of cement mass). Growth rate dependences for the concrete with UKD-1 additive on basic technological factors: cement quality, water-cement ratio value, concrete composition and concrete mixture consistency, curing environment temperature and heat-insulating characteristics of shuttering blocks have been evaluated in the paper. Such approach has made it possible to substantiate rational modes and parameters of conditions for concrete curing with the UKD-1 additive in order to ensure strength (under compression) in the 50–100 % range of the required value at the project age of 28 days without energy consumption for acceleration of its curing.

Keywords: concrete, curing kinetics, UKD-1-nanocarbon additive, non warm-up technology

For citation: Marko O. Yu., Batyanovsky E. I. (2016) Curing Kinetics of Concrete with UKD-1-Nanocarbon Additive in Version of Non Warm-Up Technology. *Science & Technique*. 15 (4), 271–280 (in Russian)

Адрес для переписки

Батяновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-87
TBSM@bntu.by

Address for correspondence

Batyanovsky Eduard I.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-87
TBSM@bntu.by

Введение

Технологию бетонирования, при которой бетон конструкций твердеет без подвода теплоты от искусственных внешних источников, принято называть беспрогревной [1–3]. Естественно, что она характеризуется минимальными затратами энергии, но одновременно и относительно невысоким темпом роста прочности бетона. А это сопровождается увеличением периода оборота опалубок и сроков строительства из монолитного бетона и увеличением технологического цикла изготовления сборных изделий. В статье приведены результаты исследований, предлагающих решение задачи по ускорению темпа роста прочности бетона в беспрогревном варианте технологии монолитного бетонирования и при изготовлении сборных изделий за счет введения в его состав комплексной добавки УКД-1. Повышенная эффективность этой добавки обеспечивается тем, что на стадии приготовления бетона она позволяет снизить на 15–25 % начальное водосодержание (за счет пластифицирующего компонента), а на стадии твердения бетона – ускорить гидролизно-гидратационные процессы в цементном тесте за счет совместного действия химической добавки – сульфата натрия и введенного в состав комплекса углеродного наноматериала (УНМ). Кроме того, структурированный УНМ (в виде ультрадисперсных частиц, а также моно- и многослойных трубок (волокон)) проявляет эффект нано-, микроармирования структуры затвердевшего цементного камня в бетоне, что обеспечивает рост его прочности на осевое растяжение и сжатие до 25 % и 15–20 % соответственно [4–6]. Под влиянием комплекса УКД-1, как будет показано далее, эффективность возрастает и соответствует приросту прочности бетона на сжатие в проектном (28 сут.) возрасте до 30 %, а за 24–48 ч твердения – в 1,5–2 раза, что и составляет основу эффективной беспрогревной технологии монолитного бетонирования (либо изготовления сборных изделий) с применением этой добавки.

Общая методика экспериментальных исследований

На начальном этапе исследований по кинетике твердения (росту прочности на сжатие) бетона определили оптимальную дози-

ровку добавки УКД-1 в бетон по методике ГОСТ 30459–96 [7] на контрольном составе бетона: цемента (М500 Д0; ОАО «Красносельскстройматериалы») Ц = 350 кг; щебня (гранитного по ГОСТ 8267–93: фракции 5–20 мм; $\rho_{\text{щ}}^0 \sim 1440 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{щ}}^3 \sim 2700 \text{ кг/м}^3$) Щ = 1100 кг; природного песка (по ГОСТ 8736–93: $\rho_{\text{п}}^0 \sim 1550 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{п}}^3 \sim 2650 \text{ кг/м}^3$; $M_k \sim 2,45$) П = 750 кг; воды В = 175 кг; подвижность смеси ОК ~ 3–4 при твердении образцов размерами 100×100×100 мм в нормально-влажностных ($\phi \geq 90 \%$; $t \sim 20^\circ\text{C}$) условиях. Для сравнения оценивали кинетику твердения бетона без добавок, с добавкой ускорителя твердения сульфата натрия (СН) и с исследуемой добавкой УКД-1 в разных дозировках относительно массы цемента.

Затем исследовали режимы твердения бетона по беспрогревной технологии при изменении температуры окружающей среды от 5 до 30 °С. При этом образцы бетона твердели в формах, имитирующих опалубки различных типов (табл. 1), с существенным различием коэффициентов теплопередачи $K_T = 0,6\text{--}3,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$ при скорости ветра $v_b = 0$. В данных экспериментах и далее использовали составы бетона, наиболее широко применяемых классов по прочности $C^{12}/_{15}\text{--}C^{32}/_{40}$, приведенные в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики форм-опалубок
Characteristics of shuttering blocks

Материал формы-опалубки и крышки	K_T (расчетный) стенок формы (крышки), Вт/(м ² ·°C), при $v_b = 0$
1. Доска, 25 мм	2,44
2. Металл (сталь), 10 мм	3,50
3. Металл (10 мм) + минераловатная плита (60 мм)	~1,00
4. Фанера (12 мм) + минераловатная плита (60 мм)	~2,98; ~0,60*
* С утеплением.	

Составы бетона с добавкой ускорителя твердения СН приняты для оценки (сравнения) эффективности исследуемой добавки УКД-1. Известно, что монодобавка СН в дозировке 1 % от массы цемента (далее – МЦ) может обеспечить реализацию весьма эффективных (со сниженными по затратам энергии) технологий

изготовления сборных изделий [1–3, 8], а сопоставление (при прочих равных условиях) результатов экспериментов позволит выявить уровень эффективности добавки УКД-1.

Таблица 2

Составы бетона для исследований
Concrete compositions for investigations

Номер состава бетона	Класс бетона	Подвижность бетонной смеси (ОК), см	Марка цемента	Расход составляющих, кг/1 м ³ бетона				В/Ц бетона	Относительное водосодержание цементного теста (X), доли ед.
				Ц	П	Щ	В		
А. Состав без добавок									
1	C ¹² _{/15}	12–14	M400	380	685	1100	201	0,53	1,60
2	C ²⁵ _{/30}	12–14	M500	465	590	1090	208	0,45	1,42
Б. Состав с добавкой 1 % СН									
3	C ¹² _{/15}	12–14	M400	360	720	1100	182	0,50	1,44
4	C ²⁵ _{/30}	12–14	M500	442	625	1100	195	0,44	1,38
В. Состав с комплексной добавкой 1 % УКД-1									
5	C ¹² _{/15}	12–14	M400	340	715	1150	163	0,48	1,32
6	C ¹² _{/15}	21–23	M400	405	720	1065	180	0,44	1,27
7	C ²⁵ _{/30}	12–14	M500	345	725	1175	146	0,42	1,20
8	C ²⁵ _{/30}	21–23	M500	420	720	1065	175	0,41	1,26
9	C ³² _{/40}	12–14	M500	400	695	1150	156	0,39	1,12

В процессе исследований периодически испытывали образцы бетона на прочность (сжатие). Эти результаты отражали кинетику ее роста в условиях, характеризовавшихся различной температурой окружающей среды и коэффициентом теплопередачи опалубки. Одновременно оценивали различные условия для накопления (аккумуляции) теплоты экзотермии цемента и обусловленного этим уровня температуры саморазогрева бетона, что фиксировали с помощью датчиков-термопар, установленных в геометрический центр бетонных образцов размерами 150×150×150 мм. Выявленные закономерности саморазогрева бетона и влияния его на кинетику роста прочности бетона с добавкой УКД-1 позволили в последующем сформулировать рекомендации по назначению режимов его естественного твердения (беспробная технология) в зависимости от качества

цемента, температуры окружающей среды, начальной температуры свежесуспенженного бетона и теплоизолирующих качеств опалубки.

Кинетика роста прочности бетона с добавкой при твердении в нормально-влажностных условиях

Результаты экспериментов, отражающие зависимость кинетики роста прочности бетона из равноподвижных смесей (ОК ~ 3–4 см) с различным количеством добавки УКД-1 и рекомендуемым для железобетона расходом наиболее широко применяемого в отрасли ускорителя твердения (1 % Na₂SO₄ от массы цемента, взятом для сравнения с [1, 3, 9]), приведены в табл. 3. Даны средние значения относительной (в % от проектной (28 сут.) прочности бетона без добавок) прочности в серии (не менее трех образцов), приведенной с поправочным масштабным коэффициентом 0,95 по ГОСТ 10180–2012 [10]; внутрисерийный коэффициент вариации не превышал 7–8 %.

Таблица 3

Влияние добавки УКД-1 на кинетику твердения бетона в нормально-влажностных условиях

Influence of UKD-1-additive on concrete curing kinetics under normal moisture conditions

Вид и количество добавки, % от МЦ	Прочность бетона, % от проектной, в возрасте, сут.					Прочность на сжатие в возрасте 28 сут.	
	1	2	3	4	7	МПа	%
Без добавок	26	43	53,0	60	71,0	38,5	100
СН; 1,00	42	66	78,0	82	91,0	40,8	106
«УКД-1»; 0,50	42	67	79,5	84	93,0	43,1	112
«УКД-1»; 0,75	44	71	83,0	91	100,5	45,4	118
«УКД-1»; 1,00	48	77	92,0	100	110,0	48,5	126
«УКД-1»; 1,50	49	78	94,0	104	111,0	49,7	129
«УКД-1»; 2,00	50	80	95,0	106	113,0	50,0	130
«УКД-1»; 1,00*	28	46	58,0	63	76,0	40,8	106
«УКД-1»; 1,50*	26	44	55,0	61	73,0	39,7	103

* Составы без уменьшения расхода воды; бетонная смесь характеризовалась подвижностью ОК_{1,0} ~ 16–18 см и ОК_{1,5} ~ 23–25 см соответственно.

Из данных табл. 3 следует, что по критерию роста прочности – расход добавки наиболее рациональна дозировка добавки УКД-1, равная ~1 % от массы цемента. Так, если увеличение относительной прочности бетона с ростом ее дозировки от 0,5 до 1,0 % в начальные сроки (1–3-и сут.) составило: (48 – 42) : 42 · 100 ~ 14,3 %

и $(92 - 79,5) : 79,5 \sim 15,7 \%$, а к 28-м сут. – $(128 - 112) : 112 \cdot 100 \sim 12,5 \%$, то с увеличением дозировки от 1,0 до 2,0 % выявлен рост прочности в 1–3-и сут. твердения: $(50 - 48) : 48 \cdot 100 \sim 4,2 \%$; $(106 - 100) : 100 \cdot 100 \sim 6 \%$, а к проектному возрасту: $(130 - 126) : 126 \cdot 100 \sim 3,2 \%$. На этом основании в последующих исследованиях использовали добавку УКД-1 в дозировке 1 % от МЦ.

Анализ всей совокупности результатов экспериментов (табл. 3, рис. 1) показывает преимущество комплексной добавки УКД-1 в сравнении с монодобавкой ускорителя твердения СН. Одновременно следует отметить, что, несмотря на снижение водосодержания бетона в равноподвижных смесях при введении добавки УКД-1 в дозировке 0,50–0,75 % от МЦ, его прочность в начальные сроки (1–2 сут.) твердения незначительно (на 2–5 %) превышала прочность с 1 % Na_2SO_4 . Очевидно, что этот эффект связан с замедляющим реакцией цемента с водой действием пластифицирующего компонента УКД-1. Однако в целом уровень прочности образцов бетона с добавкой УКД-1 оказался выше, чем образцов с 1 % Na_2SO_4 , несмотря на то что ускоряющего компонента (того же Na_2SO_4) в УКД-1 при ее дозировке 0,5–1,0 % от МЦ заведомо меньше (0,375–0,700 % от массы вещества добавки УКД-1). Отсюда следует вывод о дополнительном эффекте ускорения твердения (роста прочности) цементного бетона «присадкой» структурированного углеродного наноматериала, содержащегося в добавке УКД-1 и установленного в исследованиях [4, 6, 11].

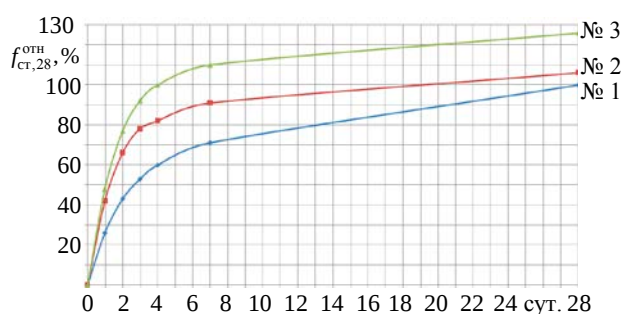


Рис. 1. Тенденция кинетики твердения бетона в нормально-влажностных условиях:
 № 1 – бетон без добавок; № 2 – с 1 % Na_2SO_4 ;
 № 3 – с 1 % УКД-1

Fig. 1. Tendencies in concrete curing kinetics under normal moisture conditions:
 No 1 – concrete without additives;
 No 2 – with 1 % of Na_2SO_4 ;
 No 3 – with 1 % of UKD-1

По результатам экспериментов, к проектному возрасту (28 сут.) прочность бетона с добавкой УКД-1 составила от 112 % (0,5 % УКД-1) до 130 % (2,0 % УКД-1) относительно прочности образцов бетона из равноподвижных смесей без добавок. При этом за 24–48 ч твердения превышение составило $\sim 1,9$ раза, а уровень прочности бетона от проектной, достигающей порядка 50 % (через 24 ч) и 70–80 % (через 48 ч), обеспечивает бездефектную распалубку конструкций с ненапрягаемой арматурой в пределах суток, а с напрягаемой – через 48 ч твердения в нормальных температурно-влажностных условиях.

Одновременно выявлено, что введение добавки УКД-1 с целью пластификации бетона (составы со звездочкой в табл. 3; подвижность бетонной смеси $\text{OK}_{1,0} \sim 16\text{--}18$ см и $\text{OK}_{1,5} \sim 23\text{--}25$ см (литая смесь)) замедлило темп роста его прочности в сравнении с бетоном с этой добавкой подвижностью 3–4 см. Вместе с тем по сравнению с бетоном без добавок аналогичного состава темп роста прочности пластифицированного бетона не только не изменился, но и характеризуется (3–6)%-м приростом прочности с 1,0–1,5 % УКД-1 в проектном (28 сут.) возрасте.

Кинетика твердения бетона в условиях «термоса»

Основная задача настоящего этапа исследований – установление зависимости кинетики роста прочности бетона с добавкой УКД-1 от его саморазогрева за счет аккумуляции теплоты экзотермии цемента. Известно, что в процессе реакции с водой затворения минералов портландцементного клинкера выделяется значительное количество теплоты. Ее аккумуляция (путем гидро-, теплоизоляции твердеющего бетона) способствует росту его температуры, что в свою очередь интенсифицирует реакции цемента с водой и тем самым повышает его тепловыделение в 1–3-и сут. твердения, а в результате – повышает темп роста прочности бетона. Этот эффект возрастает с введением в реагирующую систему цемент – вода добавок, ускоряющих твердение бетона [1, 12–15]. Таким образом, для реализации эффективной беспрогревной технологии цементного бетона необходимо максимально возможное использование экзотермии вяжущего, что может быть

достигнуто при твердении бетона по методу термоса.

На начальном этапе экспериментов установили кинетику роста прочности бетона с 1 % от МЦ добавки УКД-1 и изменение его температуры в процессе твердения в условиях гидро- и теплоизоляции. Для этого поверхность форм герметизировали полиэтиленовой пленкой и устанавливали в пенополистирольный ящик на период твердения. В геометрический центр одного из средних (в трехгнездных формах) образцов устанавливали датчик-термопару для контроля над изменениями температуры. Начальную температуру бетона приняли в диапазонах 5–8; 12–15 и 18–22 °С, как наиболее характерных для весенне-летне-осеннего периода ведения работ в Беларуси. В качестве примера использовали составы бетона класса $C^{12}/_{15}$ (ОК ~ 12–14 см) № 1 (без добавки) и № 3 (1 % УКД-1). Периодически контролируя изменения температуры и прочность твердеющего бетона, получили данные, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

Кинетика изменения температуры и прочности бетона при твердении в условиях термоса

Kinetics in temperature change and concrete strength in case of curing under thermos conditions

Порядковый номер состава по табл. 2	Группа эффективности цемента М400	Температура бетона, °С, к исходу суток				Прочность бетона, % от $f_{cm,28}$, через сутки		
		0*	1	2	3	1	2	3
А. Состав без добавок								
1	I	20	25	30	33	37	58	64
1	II	20	23	28	30	35	55	62
1	III	20	23	25	28	29	51	56
Б. Состав с добавкой УКД-1								
3	I	6	9	17	24	32	50	65
3	I	13	18	28	33	41	58	74
3	I	20	28	37	42	54	79	96
3	II	6	8	14	21	27	46	63
3	II	13	15	25	29	36	51	70
3	II	20	25	33	38	51	74	89
3	III	6	8	12	16	21	44	53
3	III	13	15	22	24	32	52	62
3	III	20	21	28	31	35	56	72
* Начальная температура свежееотформованного бетона.								

* Начальная температура свежесформованного бетона.

Из результатов эксперимента следует, что сведение к минимуму потерь теплоты экзотермии цемента позволяет даже при низкой положительной начальной температуре бетонной смеси создать в твердеющем бетоне с добавкой благоприятный температурный режим, а при начальной температуре смеси не ниже 13–15 °С обеспечить температуру в бетоне более 20 °С, т. е. фактически нормальный режим твердения.

Интенсификация процесса гидратации цемента добавкой УКД-1 повышает его тепловыделение, а аккумуляция теплоты обеспечивает саморазогрев бетона (увеличение температуры от начальной на 15–20 °С в первые 2–3 сут. твердения при использовании цемента II и I групп эффективности соответственно). Применение вяжущего III группы эффективности сопровождается низким тепловыделением и соответственно незначительным разогревом бетона и темпом роста его прочности. Фактически использование цемента III группы эффективности противоречит цели разработки и нецелесообразно для беспрогревной технологии.

Из полученных экспериментальных данных о кинетике роста прочности бетона с добавкой 1 % УКД-1 следует, что ее уровень ≥ 50 % от прочности проектного возраста (обеспечивающий условия бездефектной распалубки монолитных конструкций и сборных изделий с ненапрягаемой арматурой) достигается через 24 ч естественного твердения в условиях гидро-, теплоизоляции при использовании цемента I и II групп эффективности при пропаривании; прочность бетона ≥ 70 % в тех же условиях твердения достигается к 40–48 ч. Для бетона, приготовленного на вяжущем III группы эффективности, время твердения до $f_{ct} \geq 50$ % и $f_{ct} \geq 70$ % от $f_{ct,28}$ составляет не менее двух, трех и четырех суток соответственно.

Очевидно, что для реализации эффективной беспрогревной технологии предпочтительны цементы I группы эффективности с допущением к применению цементов II группы эффективности.

Кинетика твердения бетона в диапазоне температур 5–30 °С в зависимости от теплозащитных свойств (вида) опалубки

Исследования с целью разработки режимов твердения бетона с добавкой 1 % УКД-1 без

подвода теплоты в диапазоне температур среды твердения 5–30 °С (начальная температура бетонной смеси равнялась 5–20 °С) для ведения бетонных работ монолитным способом выполнены с учетом ранее полученных данных. Формы, в которых твердел бетон, имитировали опалубку разных типов с характеристиками, приведенными в табл. 1. В экспериментах использовали цемент ОАО «Красносельскстройматериалы» марок М400 и М500 II группы эффективности при пропаривании; остальные материалы – в соответствии с ранее приведенными характеристиками.

Образцы бетона (размерами 150×150×150 мм) изготавливали в формах с укладкой вибрированием со стандартными параметрами (амплитуда $A \sim 0,5$ мм; частота ~ 50 Гц) в течение 5–10 с (для подвижности смеси марки П3) и штыкованием с постукиванием формы о жесткое основание (литая смесь марки П5). После формования поверхность укрывали полиэтиленовой пленкой и крышкой, материал которой (а при термостатировании бетона и материал теплоизоляции) соответствовал материалу (теплоизоляции) стенок формы-опалубки. Данные экспериментальных исследований кинетики твердения бетона по росту его прочности на сжатие (внутрисерийный коэффициент вариации $V_m = 10$ %), выраженной в процентах от принятого за 100 % уровня прочности бетона аналогичных составов без добавок в проектном возрасте (28 сут.) представлены в табл. 5, а тенденция роста прочности отражена графиками на рис. 2. Результаты с индексом «*» получены при твердении бетона в утепленных минеральной ватой (толщина ~ 60 мм) металлических и фанерных формах.

Из результатов экспериментов следует, что использование добавки УКД-1 обеспечивает стабильный рост прочности бетона в сравнении с равноподвижным бетоном без добавки (составы № 1 и 2; классы $C^{12}_{/15}$ и $C^{25}_{/30}$) при всех вариантах материала палубы опалубки (металл, деревянная доска, фанера), а также с утеплением (термоизоляцией) опалубки или без него для оцениваемого диапазона температуры окружающей среды 5–30 °С. Так, повышение темпа роста прочности в 1–7 сут. составило примерно 1,5–2 раза за счет эффектов сни-

жения водосодержания в бетоне и ускоряющего действия СН и УНМ. Следует отметить, что при этом начальная температура смеси соответствовала условию $t_{см} \approx t_{нв}$ (температура наружного воздуха, т. е. среды твердения), т. е. была примерно равной 6 °С для $t_{нв} \sim 5–8$ °С; 13 °С – для $t_{нв} \sim 12–15$ °С и $t_{см} \sim 18$ °С – при $t_{нв} \sim 18–22$ °С, а также для $t_{нв} \sim 25–30$ °С.

Таблица 5

Кинетика роста прочности бетона
Kinetics in growth of concrete strength

Температура среды твердения, °С	Характеристика бетона		Наличие и вид добавки	Прочность бетона, % от $f_{с28}$ в возрасте, сут.				
	Состав по табл. 2	Класс		1	2	3	4	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А. Твердение в металлических формах*								
5–8**	1	$C^{12}_{/15}$	–	10	19	27	36	44
	2	$C^{25}_{/30}$	–	12	22	30	38	45
	5	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	24	38	49	59	74
	6	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	25	37	50	60	72
	7	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	26	36	52	61	72
	8	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	25	37	52	62	74
	7*	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	25	46	58	73	84
12–15**	1	$C^{12}_{/15}$	–	16	25	37	48	55
	2	$C^{25}_{/30}$	–	17	27	38	51	57
	5	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	29	44	59	70	75
	6	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	30	43	59	72	76
	7	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	30	44	60	71	77
	8	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	28	45	59	72	75
	7*	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	36	51	70	79	93
18–22**	1	$C^{12}_{/15}$	–	22	40	50	60	70
	2	$C^{25}_{/30}$	–	25	45	53	61	72
	5	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	34	62	76	83	93
	6	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	33	62	75	83	90
	7	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	35	64	75	86	93
	8	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	36	65	76	85	91
	7*	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	52	71	85	94	102
25–30	1	$C^{12}_{/15}$	–	30	50	72	80	86
	2	$C^{25}_{/30}$	–	34	53	72	81	90
	5	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	52	76	85	95	102
	6	$C^{12}_{/15}$	УКД-1	50	76	87	94	103
	7	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	53	77	87	96	103
	8	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	52	75	86	96	102
	7*	$C^{25}_{/30}$	УКД-1	58	83	96	101	106

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б. Твердение в фанерных формах*								
5–8	1	C ¹² / ₁₅	–	16	27	37	46	56
	2	C ²⁵ / ₃₀	–	17	28	38	51	58
	5	C ¹² / ₁₅	УКД-1	29	44	59	70	75
	6	C ¹² / ₁₅	УКД-1	30	44	60	71	76
	7	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	31	45	62	72	77
	8	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	28	45	61	72	75
	5*	C ¹² / ₁₅	УКД-1	38	52	69	77	92
	7*	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	38	55	70	79	93
12–15	1	C ¹² / ₁₅	–	23	41	52	61	70
	2	C ²⁵ / ₃₀	–	24	43	53	62	72
	5	C ¹² / ₁₅	УКД-1	34	68	76	84	92
	6	C ¹² / ₁₅	УКД-1	33	62	75	83	90
	7	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	35	63	75	86	93
	8	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	36	65	76	85	91
	5*	C ¹² / ₁₅	УКД-1	41	71	80	91	97
	7*	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	42	70	82	93	99
18–22	1	C ¹² / ₁₅	–	32	50	71	82	87
	2	C ²⁵ / ₃₀	–	34	53	72	81	90
	5	C ¹² / ₁₅	УКД-1	45	75	85	95	102
	6	C ¹² / ₁₅	УКД-1	47	74	87	96	103
	7	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	48	74	86	96	103
	8	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	47	73	86	95	102
	5*	C ¹² / ₁₅	УКД-1	52	81	93	99	101
	7*	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	57	82	94	100	103
25–30	1	C ¹² / ₁₅	–	41	60	79	87	95
	2	C ²⁵ / ₃₀	–	42	63	80	90	96
	5	C ¹² / ₁₅	УКД-1	53	82	95	100	105
	6	C ¹² / ₁₅	УКД-1	51	80	96	100	104
	7	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	54	82	96	101	106
	8	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	51	80	97	103	105
	5*	C ¹² / ₁₅	УКД-1	53	82	95	100	104
	7*	C ²⁵ / ₃₀	УКД-1	56	86	99	103	106
* С утеплением.								
** Для указанных диапазонов начальная температура бетонной смеси соответствовала этим значениям; для $t_{cp} \sim 25–30$ °C температура смеси соответствовала ~ 20 °C.								

Анализируя влияние консистенции (подвижности) бетонной смеси на темп твердения бетона, приготовленного из смесей различной подвижности, приходим к выводу, что в пределах выполненных экспериментов явно выраженная взаимосвязь этих факторов отсутствует. Например, при сравнении кинетики роста прочности бетона составов № 5 и 6, а также № 7 и 8 (табл. 2), которые характеризуются подвижностью смеси марок ПЗ и П5 соответственно, ста-

новится очевидным примерно равнозначный прирост прочности бетона при прочих равных условиях (температура среды, материал форм, степень теплоизолированности форм). Эти данные в некоторой мере противоречат известной из традиционной технологии бетона тенденции – снижения темпа роста его прочности с ростом подвижности смеси.

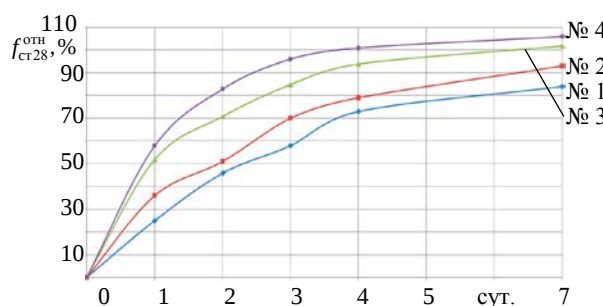


Рис. 2. Тенденция роста прочности бетона (класс C²⁵/₃₀) с добавкой 1 % УКД-1 в металлических теплоизолированных формах; № 1–4 – для температуры среды $t_{нв} = 5–8; 12–15; 18–22$ и $25–30$ °C соответственно

Fig. 2. Tendency in growth of concrete strength (class C²⁵/₃₀) with 1 % UDK-1 additive in metallic heat-insulated blocks; Nos. 1–4 – for environment temperature $t_{нв} = 5–8; 12–15; 18–22$ and $25–30$ °C respectively

Это можно объяснить следующим. В проведенных экспериментах сохранение практически постоянным темпа роста прочности бетона при увеличении пластичности смеси обусловлено тем, что повышение последней достигнуто за счет эффекта пластификации комплексной добавки при рациональной корректировке состава бетона. В результате более пластичная смесь (составы № 6 и 8) характеризуется величиной $(B/C)_{бет}$ и относительного водосодержания (X) даже несколько ниже начальной (составы № 5 и 7), что и обеспечивает необходимые условия для сохранения кинетики роста прочности бетона на равнозначном уровне в сравнении с бетоном из смеси меньшей подвижности.

Влияние материала форм (опалубки) на кинетику роста прочности бетона непосредственно связано с их теплоизолирующими свойствами и влиянием на температурный режим его твердения, т. е. с обеспечением условий для аккумуляции теплоты экзотермии цемента и повышения температуры бетона в процессе твердения. Анализируемые результаты (табл. 4) получены для бетона на цементе II группы эф-

фективности при пропаривании, степень само-разогрева которого оценивается приростом температуры бетона с добавкой (от начальной температуры смеси) на $\sim 15^\circ\text{C}$ при твердении в условиях «термоса».

Сравнительный анализ тенденций роста прочности бетона, отраженных графическими зависимостями на рис. 2, построенными по данным разделов А (металлические формы) и Б (формы из фанеры) табл. 5, при прочих равных условиях показывает следующую закономерность. Чем ниже температура среды твердения, тем более эффективно использование опалубки с меньшим коэффициентом теплопроводности, в частности с деревянной палубой, в сравнении с металлической либо металлической, но с утеплением. В металлической палубе минимален эффект накопления теплоты экзотермии цемента, так как ее коэффициент теплопередачи на $\sim 40\%$ превышает таковой для фанерной палубы (табл. 5).

Вместе с тем с повышением температуры среды твердения до $25\text{--}30^\circ\text{C}$ кинетика роста прочности бетона и в металлических, и в фанерных формах без утепления в первые 24 ч начинает сближаться и через 48 ч становится почти равнозначной. Это связано с изменением условий теплообмена в системе форма – внешняя среда и со снижением потерь теплоты внешним контуром форм с ростом $t_{\text{нв}}$ до $\sim 30^\circ\text{C}$. Данная тенденция в общих чертах сохраняется при использовании термоизолированных форм-опалубок; при этом – с большим эффектом от применения опалубки с «теплой» палубой из фанеры в сравнении с металлической палубой.

В целом эффективность опалубок по критерию влияния на темп роста прочности бетона, твердеющего в естественных условиях (беспрогревная технология), связана обратной зависимостью со значением коэффициента их теплопередачи. По экспериментальным данным, в диапазоне температур среды твердения $5\text{--}30^\circ\text{C}$ они по этому показателю располагаются в ряд: утепленная опалубка с палубой из фанеры или дерева, утепленная металлическая, деревянная или из фанеры, металлическая, т. е. в соответствии с ростом $K_t \sim 0,6\text{--}3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ для указанных разновидностей опалубки.

Оценивая эффективность применения термоизолированных опалубок для обеспечения беспрогревной технологии монолитного бетонирования по анализируемым экспериментальным данным, приходим к выводу, что в сочетании с использованием добавки УКД-1 они создают необходимые условия для обеспечения прочности бетона в 50% от проектной за $48\text{--}60$ ч твердения при температуре среды $5\text{--}8^\circ\text{C}$, за $24\text{--}48$ ч – при $t_{\text{нв}} \sim 12\text{--}15^\circ\text{C}$, за 24 ч – при $t_{\text{нв}} \sim 20\text{--}30^\circ\text{C}$. Прочность бетона $\geq 70\%$ от проектной в аналогичных условиях обеспечивается за $3\text{--}4$, $2\text{--}3$, 2 сут. соответственно. Меньшие значения времени твердения относятся к опалубке с фанерной (деревянной) палубой ($K_t \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ при скорости ветра 0). Приведенные значения прочности бетона обеспечивают бездефектную распалубку вертикальных и наклонных конструкций ($\geq 50\%$), а также изгибаемых и с преднапряжением арматуры ($\geq 70\%$). Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что утепленные опалубки рекомендуются к использованию и в летний период работ, так как обеспечивают наиболее благоприятный температурный режим твердения бетона за счет аккумуляции (накопления) теплоты экзотермии цемента в его объеме.

ВЫВОДЫ

1. Установлена рациональная дозировка в бетон добавки УКД-1, которая обеспечивает рост подвижности бетонной смеси от марки П1 до марки П4, а при снижении водосодержания бетона и соблюдении условия равноподвижности смеси (марка П1) рост его прочности в проектном возрасте до 25% , составляющая $\sim 1,0\%$ от массы цемента при рекомендуемых по действующим техническим условиям пределах дозирования этой добавки ($0,5\text{--}1,5\%$ от МЦ).

2. Экспериментально установлено, что в нормальных условиях твердения прочность бетона с 1% УКД-1 в сравнении с бетоном без добавок из равноподвижных смесей марки П1 составляет в 1-е сут. $45\text{--}50\%$ от проектной ($\sim 25\%$ без добавок), достигает $70\text{--}80\%$ через 2 сут. и $\geq 90\%$ – через 3 сут. (без добавок $\sim 45\%$ и 55% соответственно), чем обеспе-

чиваются необходимые и достаточные предпосылки для реализации эффективной беспрогревной технологии монолитного бетонирования и изготовления сборных изделий.

3. Экспериментально выявлены закономерности изменения температуры и прочности бетона с добавкой 1 % УКД-1 и без нее, твердеющего в условиях теплоизоляции (условиях «термоса») в течение 1–3 сут. (т. е. накапливая теплоту экзотермии вяжущего) при начальной температуре смеси 6, 13 и 20 °С и цементах I, II и III групп эффективности. Зафиксирован уровень саморазогрева бетона без добавок на 8–13 °С сверх начальной температуры смеси (большее значение для цемента I группы эффективности), а также с 1 % УКД-1 (на цементе I группы) – на 18–22 °С сверх начальной температуры смеси (большее значение – для $t_{б.см}^{нач} \sim 20$ °С), что обеспечивает уровень температуры твердеющего бетона до 30–40 °С и высокий темп роста его прочности без дополнительного подвода теплоты от внешних источников.

4. Экспериментально исследована кинетика роста прочности бетонов (на примере классов $C^{12/15}-C^{32/40}$) при подвижности марок ПЗ и П5 на цементе II группы эффективности, т. е. наиболее широко применяемых в общестроительном производстве) в диапазоне температур бетонной смеси 5–20 °С и наружного воздуха 5–30 °С (соответствующем условиям ведения работ в весенне-летне-осенний период в Беларуси), при твердении образцов в различных видах форм (опалубки), характеризующихся разными коэффициентами теплопередачи: $K_T \sim 0,6-3,5$ Вт/(м²·°С), что соответствует применяемым в строительстве типажам опалубок. Определены режимы твердения бетона с добавкой УКД-1 без подвода теплоты от внешних источников (по беспрогревной технологии), обеспечивающие достижение прочности бетона в диапазоне 50–100 % от прочности проектного (28 сут.) возраста с учетом конкретных условий ведения работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э. И. Технологические особенности производства ЖБК с применением ускорителей твердения бетона / Э. И. Батяновский, Р. Ф. Осос // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительство зданий и сооружений: сб. ст.; под ред. Н. П. Блещика, Э. И. Батяновского. Брест: БрПИ, 1998. Вып. 1. С. 22–25.
2. Парфенова, Л. М. Перспективы применения химических добавок в малоэнергоемких технологиях возведения бетонных и железобетонных конструкций / Л. М. Парфенова // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 17–20 окт. 2000 г.; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. Минск: Технопринт, 2000. С. 84–88.
3. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. И. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. 2006. № 3. С. 7–17.
4. Батяновский, Э. И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента / Э. И. Батяновский, П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: XVI Междунар. науч.-метод. семинар; под общ. ред. П. С. Пойты, В. В. Тура. Брест: БрГТУ, 2009. Ч. 2. С. 136.
5. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / Э. И. Батяновский [и др.] // Строительная наука и техника. 2010. № 1–2. С. 3–10.
6. Батяновский, Э. И. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая наноуглеродные добавки / Э. И. Батяновский, В. Д. Якимович, П. В. Рябчиков // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. материалов III Междунар. симпозиума. Минск: РУП «БелНИИС», 2011. Т. 2. С. 53–68.
7. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459–96. Введ. 01.07.98. Минск: Минсктиппроект, 1998. 40 с.
8. Марцинкевич, В. Л. Энергосберегающие технологии производства бетона / В. Л. Марцинкевич, А. С. Дыдышко. Минск, 2006. 283 с.
9. Применение добавок в бетоне: ПП–99 к СНиП 3.09.01–85. Введ. 01.07.2000. Минск: Минстройархитектуры, 2000. 33 с.
10. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Взамен ГОСТ 10180–90; введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
11. Батяновский, Э. И. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах / Э. И. Батяновский, Г. С. Галузо, М. М. Мордич // Наука – образованию, производству, экономике: сб. материалов Девятой Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2011. Т. 2. С. 272–273.
12. Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окороков, А. А. Парийский. Л.: Стройиздат, 1966. 316 с.
13. Тейлор, К. Химия цемента / К. Тейлор; пер. с англ. М.: МИР, 1986. С. 174–276; 300–319; 418–429.
14. Протько, Н. С. Беспрогревная и малоэнергоемкая технология производства бетонных и железобетонных изделий с применением полиметаллического водного концентрата / Н. С. Протько. Минск: Белор. гос. политехн. академия, 2001. 20 с.

15. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий. Минск, 2005. С. 29–89; 167–178.

Поступила 14.03.2016

Подписана в печать 16.05.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Batyanovsky E. I., Osos R. F. (1998) Technological Peculiarities in Production of Reinforced Concrete Structures While Applying Concrete Rapid Hardener. *Problemy Tekhnologii Proizvodstva Stroitelnykh Materialov, Izdelii i Konstruktsii, Stroitelstvo Zdanii i Sooruzhenii. Sbornik Statei* [Problems in Technology of Production of Construction Materials, Products and Structures. Collection of Papers]. Brest: Brest Polytechnical Institute, 1, 22–25 (in Russian).
2. Parfionova L. M. (2000) Prospects for Application of Chemical Admixtures in Low-Energy Consuming Technologies for Concrete and Reinforced Concrete Structural Construction. *Perspektivy Razvitiia Novykh Tekhnologii v Stroitelstve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov v Respublike Belarus. Materialy VI Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Seminara* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel in the Republic of Belarus. Proceedings of 6th International Scientific and Technical Workshop]. Minsk, Tekhnoprint, 84–88 (in Russian).
3. Batyanovsky E. I., Ivanova E. I., Osos R. F. (2006) Efficiency and Problems of Energy-Saving Technologies for Cement Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (3), 7–17 (in Russian).
4. Batyanovsky E. I., Ryabchikov P. V., Yakimovich V. D. (2009) Influence of Carbonic Nano-Materials on Cement Properties. *Perspektivy Razvitiia Novykh Tekhnologii v Stroitelstve i Podgotovke Inzhenernykh kadrov Respubliki Belarus: XVI Mezhdunar. Nauch.-Metod. Seminar. Chast 2* [Prospects for the Development of New Technologies in the Construction and Preparation of the Engineering Staff of the Republic of Belarus. 16th International Scientific and Methodological Workshop. Part 2]. Brest: Brest State Technical University, 136 (in Russian).
5. Batyanovsky E. I., Krauklis A. V., Samtsov P. P., Riabchikov P. V. (2010) Influence of Carbonic Nano-Materials on Cement Properties and Cement Paste. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (1–2), 3–10.
6. Batyanovsky E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. (2011) Peculiarities in Technology of High-Strength Concrete on Local Materials Including Nanj-Carbonic Additives. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona. Sb. mater. III Mezhdunar. Simpoziuma. T. 2* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Information Package of 3rd International Symposium. Vol. 2.] Minsk, BelNIIS, 53–68 (in Russian).
7. State Standard 30459–96. Concrete Additives. Methods for Efficiency Determination. Minsk, Minsktipproekt, 1998. 40 (in Russian).
8. Martsinkevich V. L., Dydyshko A. S. (2006) *Energy-Saving Technologies for Concrete Production*. Minsk. 283 (in Russian).
9. П1–99 for SNiP 3.09.01–85. Application of Additives for Concrete. Minsk, Minstroyarkhitektura, 2000. 33 (in Russian).
10. State Standard 10180–2012. Concrete. Methods for Determination of Strength in Accordance with Control Specimen. Moscow, Standartinform, 2013. 38 (in Russian).
11. Batyanovsky E. I., Galuzo G. S., Mordich M. M. (2011) Peculiarities in Application of Carbonic Nano-Materials in Structural and Insulation Foamed Concrete. *Nauka – Obrazovaniu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Deviatoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 2* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 9th International Science and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk: BNTU, 272–273 (in Russian).
12. Zaporozhets I. D., Okorokov S. D., Pariysky A. A. (1966) *Heat Liberation of Concrete*. Leningrad, Stroyizdat. 316 (in Russian).
13. Taylor H. (1990) *Cement Chemistry*. 2nd ed. London, Academic Press. 491 (Russ. ed.: Teilor K. (1986) *Khimiiia Tsementa*. Moscow, Mir, 174–276; 300–319; 418–429).
14. Protko N. S. (2001) *Non-Heating and Low Energy-Consuming Technology for Production of Concrete and Reinforced Concrete Products with Application of Polymetallic Water Concentrate*. Minsk: Belarusian State Polytechnical Academy. 20 (in Russian).
15. Babitsky V. V. (2005) *Structure and Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete*. Minsk, 29–89; 167–178 (in Russian).

Received: 14.03.2016

Accepted: 16.05.2016

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-281–286

УДК 691.327

Влияние цитрата натрия на процесс формирования цементного камня в глиноземистом вяжущем

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾, докт. хим. наук, проф. Д. В. Свиридов²⁾,
кандидаты хим. наук Г. Л. Щукин²⁾, А. Л. Беланович²⁾,
В. П. Савенко²⁾, канд. хим. наук С. А. Карпушенков²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассмотрено влияние цитрата натрия на процесс формирования цементного камня на основе глиноземистого вяжущего. Образование каркаса цементного камня в цементном гидравлическом вяжущем сопровождается протеканием сложных физико-химических процессов межфазового взаимодействия и диспергирования, которые определяются качественным и количественным составом цементного раствора, постоянным изменением его свойств от начала приготовления до твердения. Добавка цитрата натрия в воду затворения увеличивает гидратацию как портландцемента, так и глиноземистого цемента. Процесс увеличения скорости гидратации цемента является следствием деструкции поверхностных образований и исключения эффекта торможения скорости гидратации и гидролиза продуктов взаимодействия клинкерного материала с водой затворения. Установлено, что цитрат натрия позволяет управлять процессами гидратации, гидролиза, схватывания и твердения цементной массы. Высокая степень гидратации глиноземистого цемента в присутствии цитрата натрия обеспечивает быстрое схватывание и твердение вяжущего, низкую пористость и достаточно высокую прочность на сжатие цементного камня во все сроки твердения. Увеличение концентрации цитрата натрия в цементной смеси до 10 % от массы цемента не только оказывает влияние на процесс разжижения цементного раствора, сокращение времени схватывания и твердения цементной массы, но и повышает прочность на сжатие цементного камня. Анализ структуры поверхности скола цементного камня дает основание утверждать, что добавка цитрата натрия обеспечивает уплотнение цементного камня и уменьшение его водопоглощения.

Ключевые слова: глиноземистое вяжущее, цементный камень, водопоглощение, цитрат натрия

Для цитирования: Влияние цитрата натрия на процесс формирования цементного камня в глиноземистом вяжущем / С. Н. Леонович [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 281–286

Sodium Citrate Influence on Formation of Cement Stone in the Aluminous Binder

S. N. Leonovich¹⁾, D. V. Sviridov²⁾, G. L. Shchukin²⁾, A. L. Belanovich²⁾,
V. P. Savenko²⁾, S. A. Karpushenkov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper deals with the effect of sodium citrate on the formation of a cement stone in the aluminous binder. Formation of cement stone framework in cement hydraulic binder is accompanied with complicated physical and chemical processes of interphase interactions and dispersion, these processes are predicated on qualitative and quantitative composition

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

of the cement mortar, continuous changes in its properties from preparation stage till curing. Addition of sodium citrate to tempering water enhances hydration of both Portland cement and calcium aluminate cement. Process pertaining to an increase of cement hydration rate is considered as a consequence of destruction in surface formations and exclusion of damping effect in respect of hydration rate and hydrolysis of products resulted from interaction of clinker material with tempering. It has been established that sodium citrate makes it possible to control processes of hydration, hydrolysis, binding and curing for cement mass. High degree of hydration of aluminous cement in the presence of sodium citrate provides fast binding and curing of binder, low porosity and rather high compression breaking strength of cement stone for all curing stages. An increase in concentration of sodium citrate in cement mixture up to 10 % of the cement mass exerts an influence not only on the process of cement mortar liquefaction, reduction of time for cement mass setting and hardening but also increases compression strength of cement stone. An analysis of the structure for cleavage surface of cement stone gives ground to declare that the addition of sodium citrate provides cement stone sealing and reduces its water absorption.

Keywords: aluminous binder, cement stone, water absorption, sodium citrate

For citation: Leonovich S. N., Sviridov D. V., Shchukin G. L., Belanovich A. L., Savenko V. P., Karpushenkov S. A. (2016) Sodium Citrate Influence on Formation of Cement Stone in the Aluminous Binder. *Science & Technique*. 15 (4), 281–286 (in Russian)

Введение

Формирование каркаса цементного камня в цементном гидравлическом вяжущем сопровождается протеканием сложных физико-химических процессов межфазового взаимодействия, которые определяются качественными и количественными составами цементного раствора, постоянным изменением его свойств от начала приготовления до твердения. Без четкого понимания механизмов этих процессов трудно выбрать правильное решение о составе, добавках и технологиях, необходимых при использовании цементного гидравлического вяжущего. Лидерами среди гидравлических вяжущих в строительной индустрии являются портландцемент и глиноземистые цементы. Отличительные особенности глиноземистых цементов – их состав и функциональные свойства. Если в портландцементе активными компонентами, определяющими его свойства, являются силикаты кальция (C_3S , C_2S), то свойства глиноземистых цементов определяются наличием в их составе низкоосновных алюминатов кальция (CA , CA_2).

Для цементного камня, полученного из глиноземистого цемента, характерны такие свойства, как высокая огнеупорность, химическая стойкость к воздействию агрессивных сред, а также трехдневная прочность, в ряде случаев превышающая 28-дневную прочность камня, полученного из портландцемента. Все это обеспечивает широкий спектр его применения в различных областях промышленности и строительства. Однако в отличие от камня, полученного из портландцемента, для камня из глиноземистого цемента характерны фазовые превращения при твердении, сопровождающиеся снижением прочности при длительном хранении.

Причина падения прочности цементного камня из глиноземистого цемента, по общему мнению многих исследователей, – перекристаллизация в кубическую форму гексагональных гидроалюминатов, образующихся при гидратации цемента. Этот процесс называют болезнью глиноземистого цемента. При твердении глиноземистой массы выделяется в два раза больше теплоты, чем при твердении цементного раствора портландцемента. Повышение температуры цементного раствора глиноземистого цемента выше 30 °С чревато уменьшением прочности цементного камня. Последнее ограничивает применение глиноземистого бетона при изготовлении массивных строительных конструкций.

В [1–5] рассматриваются различные способы предотвращения снижения прочности глиноземистого цементного камня. Предлагается вводить в состав глиноземистого цемента твердые вяжущие (шлаки, метакраин, ангидрит), растворимые соли (электролиты) с целью изменения состава продуктов гидратации цемента или установить технические параметры изготовления бетонов: температуру, усадку, твердение и т. д.

Высокая жаростойкость глиноземистых цементов объясняется тем, что образующиеся при их твердении гидроалюминаты имеют устойчивую слоистую структуру. Кристаллохимическая вода из таких слоистых гидроалюминатов удаляется медленно, без разрушения кристаллов и снижения прочности.

Следует отметить, что, несмотря на высокую стоимость глиноземистого цемента, его дефицит и недостаточную изученность особенностей твердения в присутствии различных по химической природе добавок, интерес к его использованию в качестве строительного огнезащитного материала только увеличивается.

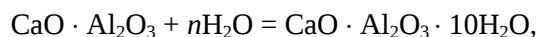
Поэтому получение новых данных о влиянии различных добавок также важно. Одной из перспективных добавок, регулирующих процессы гидратации, схватывания и твердения бетонов, является цитрат натрия, который успешно использовался ранее при изготовлении бетонных смесей на основе портландцемента [6, 7].

Цель данной работы – исследование процессов гидратации, схватывания и твердения модифицированного цитратом натрия глиноземистого цементного раствора.

Результаты исследований и их обсуждение

Для достижения поставленной цели в качестве основного компонента цементного раствора использовали глиноземистый цемент GORKAL 40 производства цементного завода г. Горка (Польша) и цитрат натрия, применение которого в портландцементном растворе изложено в [3, 4]. Составы растворных смесей готовили с учетом требований ГОСТ 28023–89. Добавку цитрата натрия вводили в воду затворения для ее полного растворения. При испытании растворных смесей определяли их пластические свойства по методу мини-конуса [8], сроки схватывания – с помощью прибора Вика (ГОСТ 310.3–76), предел прочности на сжатие цементного камня в возрасте 7 и 28 сут. – по ГОСТ 10180–90, водопоглощение образцов цементного камня – по ГОСТ 12730.3–78. Электронно-микроскопическое исследование микроструктуры поверхности скола цементного камня без и с добавкой цитрата натрия после 28 сут. твердения проводили с помощью растрового электронного микроскопа LEO-1420.

Известно, что гидратация, последующий гидролиз и скорость твердения раствора глиноземистого цемента обусловлены взаимодействием составляющих его гидроалюминаткальциевых соединений. Взаимодействие однокальциевого алюмината (СА) с водой затворения приводит к образованию гидратных соединений



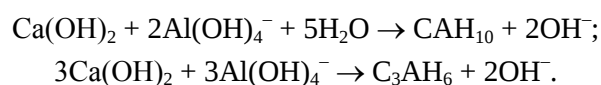
которые при температуре до 30 °С постепенно в присутствии ограниченного количества воды переходят в двухкальциевый гидроалюминат $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и выделяются в виде пластинчатых кристаллов, а также гелевидной массы, содержащей $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и аморфный гидроксид алюминия в основных формах:

$\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$, $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$. Устойчивость этих образований определяется различными факторами, в частности щелочностью ($\text{pH} = 7,0\text{--}11,6$), концентрацией и аморфностью гидроксидов алюминия, содержанием свободной воды в геле и т. д.

Гидратация минералов глиноземистого цемента сопровождается экстрагированием оксида кальция из структуры алюминатов в воду затворения, делая ее за счет взаимодействия $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ щелочной, с $\text{pH} = 10\text{--}11$. Степень экстрагирования CaO из структуры алюмината кальция зависит не только от минералогического состава цемента, фазовых превращений гидратов, но и от количества воды затворения. При этом процесс протекает с образованием неустойчивого пересыщенного раствора соединений кальция и алюминия, из которого со временем выделяется твердая фаза низкоосновного алюмината кальция.

Очевидно, что процесс пересыщения протекает в стесненных условиях гелевидной массы. Можно утверждать, что концентрация соединений кальция и алюминия в гелевидной массе является важным фактором, обуславливающим механизм схватывания и твердения алюмокальциевого вяжущего.

В [9] установлено, что определяющую роль в процессе конденсационного структурного образования в вяжущих алюмокальциевых системах играют катионы кальция, способные взаимодействовать с алюмосолями и участвовать в твердофазных реакциях путем катионного обмена со щелочными ионами алюминия по схеме:



Из пересыщенной алюмокальциевыми гидратами гелеобразной массы по достижении определенных условий вблизи и на поверхности цементных зерен выделяются новообразования, которые со временем стесняют рост кристаллов. Межпоровое пространство постепенно заполняется частицами гидратов, и цементное тесто теряет свою подвижность. На поверхности твердеющего тела при соприкосновении микрокристаллов образуются коагуляционные и кристаллизационные контакты.

Гидратация глиноземистого цемента – многоступенчатый процесс, включающий реакции

Таблица 1

Концентрация цитрата натрия, % от массы цемента (В/Ц = 0,3)	Расплав мини- конуса, мм	Время схватывания цементного раствора, мин	
		Начало	Конец
–	40	320	425
1	120	40	65
2	130	28	45
4	132	12	35
6	133	10	20
10	132	15	28
15	130	35	55

взаимодействия воды затворения с клинкерным материалом, растворение продуктов гидролиза, создание насыщенных и пересыщенных гелевидных масс, выделение зародышей кристаллизации из пересыщенных растворов, их адсорбцию по поверхности кристаллических структур вяжущего материала и т. д. Наиболее эффективное средство воздействия на формирование цементного камня из глиноземистого цемента – электролиты, которые позволяют изменить процесс гидратации, вызвать образование низкоосновных гидроалюминатов кальция, изменить размер и форму кристаллов.

Механизм действия электролитов в системе взаимодействия глиноземистого цемента с водой затворения, скорее всего, состоит в интенсивном диспергирующем действии. Последнее вызывает ускорение гидратации поверхности клинкерных алюмокальциевых частиц. Механизм действия добавок электролитов заключается в изменении растворимости продуктов гидратации и гидролиза СА и СА₂ в вяжущем. К факторам, увеличивающим скорость гидратации как портландцемента, так и глиноземистого цемента, относятся и добавки, повышающие растворимость минералов клинкера или способствующие выводу продуктов гидратации из зоны реакции. К таким добавкам следует отнести цитрат натрия.

Установлено, что добавка цитрата натрия в воду затворения увеличивает гидратацию как портландцемента, так и глиноземистого цемента. Процесс увеличения скорости гидратации цемента является следствием деструкции поверхностных образований и исключения эффекта торможения скорости гидратации и гидролиза продуктов взаимодействия клинкерного материала с водой затворения. При затворении глиноземистого цемента с водой, содержащей цитрат натрия, последний взаимодействует с продуктами гидратации цемента – гидроксидами алюминия и кальция. Этот процесс с повышением концентрации цитрата натрия до 10 % в воде затворения сопровождается увеличением щелочности смеси рН с 11,6 до 12,4 и скорости гидратации глиноземистого цемента. Добавка в систему цементного раствора с В/Ц = 0,3 цитрата натрия в количестве 1–15 % по отношению к массе цемента оказывает существенное влияние не только на процесс разжижения раствора, но и на сокращение времени схватывания и твердения всей цементной массы (табл. 1).

Как видно из табл. 1, максимальное пластифицирующее действие добавки цитрата натрия в растворной цементной смеси достигается при концентрации 2 % по отношению к массе цемента при В/Ц = 0,3 и затем практически не меняется с ее увеличением до 15 %. Введение добавки цитрата натрия в растворную смесь оказывает на нее пластифицирующее действие, что позволяет снизить водоцементное соотношение с 0,30 до 0,25. Сроки схватывания растворных смесей существенно зависят от концентрации цитрата натрия в них. Начало схватывания цементной массы без цитрата натрия составляет 320 мин, а конец схватывания 425 мин. При введении в цементное тесто 2 и 6 % цитрата натрия (по отношению к массе цемента) начало схватывания соответственно составляет 28 и 10 мин, а конец схватывания 45 и 20 мин. Установлено, что присутствие в цементном тесте цитрата натрия через некоторое время вызывает интенсивное объемное поглощение влаги. Последнее определяется началом процесса схватывания цементного теста.

Прочность на сжатие цементного камня также зависит от концентрации цитрата натрия в цементной смеси (табл. 2). С увеличением концентрации цитрата натрия с 0 до 10 % в цементной смеси прочность цементного камня после его твердения в течение 7 и 28 сут. увеличивается соответственно с 19,4 и 23,2 МПа до 67,7 и 81,8 МПа, а затем уменьшается до 51,4 и 76,4 МПа соответственно при 15 % концентрации цитрата натрия.

Высокая скорость гидратации цемента в присутствии цитрата натрия способствует созданию пересыщенной жидкой фазы, приводящей к формированию центров кристаллических новообразований, появлению прочного кристаллического каркаса структуры, быстрому заполнению его пор гелеобразными продуктами

ми. Это подтверждается данными, полученными при изучении водопоглощения образцов цементного камня без и с добавкой цитрата натрия. Как видно из результатов, представленных в табл. 2, водопоглощение цементного камня по сравнению с контрольным образцом уменьшается с увеличением концентрации цитрата натрия в цементной смеси.

Таблица 2

Концентрация цитрата натрия, % от массы цемента	В/Ц	Прочность цементного камня, МПа, в возрасте, сут.		Водопоглощение, %
		7	28	
—	0,30	19,4	23,2	4,6
1	0,25	30,4	38,4	4,5
2	0,25	35,4	41,6	3,8
4	0,25	47,6	58,2	2,9
6	0,25	58,6	67,4	0,9
10	0,25	67,7	81,8	0,7
15	0,25	51,4	76,4	0,8

Электронно-микроскопическое исследование микроструктуры поверхности скола цементного камня без и с добавкой цитрата натрия в количестве 6 % от массы цемента показало, что при добавлении цитрата натрия

в цементную массу наблюдается снижение пористости цементного камня (рис. 1).

Анализ структуры поверхности затвердевшего цементного камня (рис. 1) дает основание утверждать, что введение цитрата натрия в воду затворения глиноземистого цемента обеспечивает уплотнение цементного камня. При этом формируется блочная структура с плотной упаковкой. Последнее обусловлено тем, что под действием цитрата натрия достаточно быстро образуется гелеобразная масса, которая заполняет межпоровое пространство. При соприкосновении субмикроструктур образуются коагуляционные и кристаллизационные контакты [10], и цементное тесто теряет свою подвижность. Высокое пересыщение жидкой фазы обуславливает образование кристаллизационных контактов и срастание частиц. Данный процесс приводит к созданию каркаса кристаллизационной структуры, ее обрастанию и объемному наполнению гелевым продуктом. Кроме того, этот процесс регулируется скоростью образования в объеме цементного раствора гелевой массы, способной при определенных условиях быстро схватываться и твердеть.

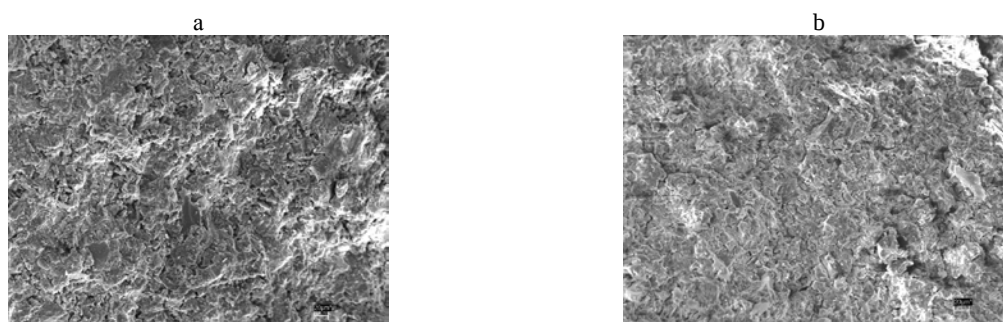


Рис. 1. Микроструктура поверхности скола цементного камня: а – не содержащего цитрата натрия; б – содержащего 6 % цитрата натрия

Fig. 1. Cleavage surface microstructure of cement stone: а – without sodium citrate; б – with 6 % of sodium citrate

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что цитрат натрия, введенный в состав раствора глиноземистого цемента, позволяет управлять процессом гидратации, гидролиза, схватывания и твердения цементной массы. Очевидно, что упрочнение цементного камня в первый период твердения обусловлено появлением новообразований, ростом их кристаллов, увеличением количества контактов срастания кристаллов с образованием сростков, уплотняющихся в единый каркас. Прочность

структуры цементного камня определяется степенью гидратации исходных клинкерных материалов. Чем больше степень гидратации цемента за один и тот же период, тем выше степень пересыщения жидкой фазы.

2. Высокая начальная скорость гидратации, гидролиза при растворении зерен цемента способствует созданию пересыщенной жидкой фазы, приводящей к образованию центров кристаллизации новообразований, появлению прочного кристаллического каркаса структуры, быстрому заполнению ячеек каркаса гелеоб-

разным продуктом. Высокая степень гидратации глиноземистого цемента в присутствии цитрата натрия обеспечивает низкую пористость и водопоглощение цементного камня и соответственно высокую его прочность на сжатие во все сроки твердения.

3. Введение в состав цементного теста цитрата натрия, который связывает ионы кальция в малорастворимый цитрат кальция, способствует предотвращению перекристаллизации гидроалюминатов и увеличению плавного нарастания прочности на сжатие цементного камня с возрастанием в цементной смеси концентрации цитрата натрия до 10 % от массы цемента. Можно предположить, что вывод из жидкой фазы гидратированного цемента ионов Ca^{+2} путем связывания их цитратом натрия в малорастворимые соли сдвигает равновесие в цементной системе в сторону растворения цементных зерен. В этом проявляется ускоряющее действие цитрата натрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова, Т. В. Глиноземистые цементы / Т. В. Кузнецова, Й. Талабер. М.: Стройиздат, 1988. 266 с.
2. Плотников, В. В. Вяжущее на основе глиноземистого цемента и активных минеральных добавок для общестроительных целей / В. В. Плотников, Ю. Р. Кривобородов, А. В. Болтунов. Брянск: Брянский технол. ин-т, 2002. С. 39–43.
3. Кравченко, И. В. Глиноземистый цемент / И. В. Кравченко. М.: Госстройиздат, 1960. 175 с.
4. Robson, T. D. High Alumina Cements and Concretes / T. D. Robson. New York: John Wiley & Sons, 1962. 263 p.
5. Талабер, Й. Глиноземистый цемент / Й. Талабер // Труды VI Междунар. конгресса по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 140–148.
6. Продление срока годности растворов смесей / С. Н. Леонович [и др.] // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 74–77.
7. Способ получения ускорителя твердения для бетонов и строительных растворов: пат. 18077 Респ. Беларусь: МПК C04B 103/14, C04B 24/04 / В. П. Савенко, Г. Л. Щукин, С. Н. Леонович [и др.]; дата публ.: 30.04.2014.
8. Иванов, Ф. М. Добавки в бетон и перспективы применения суперпластификаторов / Ф. М. Иванов // Бетоны с эффективными суперпластификаторами: сб. статей. М.: НИИЖБ, 1979. С. 6–21.
9. Кривобородов, Ю. Р. Влияние минеральных добавок на гидратацию глиноземистого цемента / Ю. Р. Кривобородов, А. А. Бойко // Техника и технология силикатов. 2011. № 4. С. 14–16.

10. Гидратационно-дегидратационный процесс получения искусственного камня на основе щелочных алюмосиликатных связок / П. В. Кривенко [и др.] // Цемент. 1993. № 3. С. 39–40.

Поступила 13.01.2016

Подписана в печать 14.03.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Kuznetsova T. V., Talaber J. (1988) *Aluminous Cements*. Moscow, Stroyizdat. 266 (in Russian).
2. Plotnikov V. V., Krivoborodov Yu. R., Boltunov A. V. (2002) *Binder on the Basis of Aluminous Cement and Active Mineral Additives for General Construction Purposes*. Bryansk: Bryansk Technological Institute, 39–43 (in Russian).
3. Kravchenko I. V. (1960) *Aluminous Cement*. Moscow, Gosstroyizdat. 175 (in Russian).
4. Robson T. D. (1962) *High Alumina Cements and Concretes*. New York, John Wiley & Sons. 263.
5. Talaber J. (1976) *Aluminous Cement. Trudy VI Mezhdunarodnogo Kongressa po Khimii Cementa. T. 3.* [Proceedings of the 6th International Congress on Chemistry of Cement. Vol. 3]. Moscow, Stroiizdat, 140–148 (in Russian).
6. Leonovich S. N., Sviridov D. V., Belanovich A. L., Shchukin G. L., Savenko V. P., Karpushenkov S. A., (2012) Extension of Expiry Date for Mortar Mixes. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (10), 74–77 (in Russian).
7. Savenko V. P., Shchukin G. L., Leonovich S. N., Sviridov D. V., Belanovich A. L., Radiukevich P. I., Karpushenkov S. A. (2012) Method for Obtaining Concrete and Mortar Hardener. Patent of the Republic of Belarus No 18077 (in Russian).
8. Ivanov F. M. (1979) Concrete Additives and Prospects for Application of Superplasticizers. *Betony s Effektivnymi Superplastifikatorami. Sb. Statei* [Concrete with Efficient Super-Plasticizers. Collection of Papers], Moscow, NIIZhB, 6–21 (in Russian).
9. Krivoborodov Yu. R., Boyko A. A. (2011) Influence of Mineral Additives on Hydration of Aluminous Cement. *Tekhnika i Tekhnologiya Silikatov* [Equipment and Technology of Silicates], (4), 14–16 (in Russian).
10. Krivenko P. V., Skurchinskaia Zh. V., Demianova L. E., Bobunova E. G. (1993) Hydration and Dehydration Process for Obtaining an Artificial Stone on the Basis of Alkaline and Alumino-Silicate Binders. *Tsement* [Cement], (3), 39–40 (in Russian).

Received: 13.01.2016

Accepted: 14.03.2016

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-287–291

УДК 628.112

Использование фильтров из волокнистых материалов в мелиоративном и гидротехническом строительстве

Докт. техн. наук, проф. В. Т. Климков¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. При строительстве первых дренажных трубчатых систем столкнулись с проблемой защиты их от заиливания частицами грунта, проникающими через входные отверстия. Поиски и исследования привели к использованию различных волокнистых материалов, играющих роль фильтров. Вначале широко применялись стеклохолсты. Однако они, обладая хорошими фильтрационными свойствами, имели ряд существенных недостатков. Большую роль в использовании пластмасс сыграли работы, выполненные в Институте механики металлополимерных систем (г. Гомель, Республика Беларусь). Разработана технология получения термоскрепленных волокон из термопластов, названных полиэтилен-холстами. Исследование свойств последних под нагрузкой показало, что при определенных давлениях их поперечная и продольная проницаемости становятся равными, т. е. материал делается изотропным. Рассмотренные взаимодействия фильтрующего материала и опорного каркаса выявили, что основная фильтрация воды происходит непосредственно над перфорационными отверстиями, в то время как материал над глухими участками каркаса в работе не участвует. В связи с этим разработана новая конструкция фильтрующего элемента, который может использоваться в водозаборах поверхностных и подземных вод. Фильтрующий элемент состоит из опорного каркаса с отверстиями и установленного на нем фильтрационного покрытия. Между ними на опорном каркасе выполнены водоподводящие полости – канавки, расходящиеся в виде лучей от перфорационных отверстий. Эти канавки могут иметь боковые ответвления второго, третьего и т. д. порядков. Поскольку лучеобразное расположение канавок создает кратчайшие пути потоку профильтровавшейся воды от периферии к отверстиям каркаса, а площадь поперечного сечения канавок в сотни раз превосходит площадь поровых ходов в водоприемном покрытии, обеспечивается свободное движение воды к отверстиям, а тем самым высокая производительность элемента, так как в работу вовлекается почти вся поверхность водоприемного покрытия. Такие фильтрующие элементы могут использоваться в различных конструкциях фильтрования жидкостей и газов.

Ключевые слова: полиэтилен-холст, водопроницаемость, изотропия, водоподводящие канавки

Для цитирования: Климков, В. Т. Использование фильтров из волокнистых материалов в мелиоративном и гидротехническом строительстве / В. Т. Климков // *Наука и техника*. 2016. Т. 15. № 4. С. 287–291

Usage of Filters from Fibrous Materials in Ameliorative and Hydro-Technical Construction

V. T. Klimkov¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Construction of first drainage tubular systems has been facing such problem as their protection against silting-up by soil particles penetrating through input openings. Searches and investigations have led to usage of various fibrous materials which are playing the role of filters. At the beginning glass-fibre mats have been widely applied for this purpose. However, the mats possessing good filtration properties have had a number of fundamental disadvantages. Works executed at the Institute of Mechanics of Metal Polymeric Systems (Gomel, Republic of Belarus) have played a big role in usage of plastic

Адрес для переписки

Климков Василий Тихонович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-71-74
fes@bntu.by

Address for correspondence

Klimkov Vasily T.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-71-74
fes@bntu.by

materials. A new technology has been developed with the purpose to obtain thermally-bonded fibres from thermoplastic material. The fibres have been called as polyethylene mats. Investigation of their properties has been carried out under load and it has revealed that their lateral and longitudinal permeability becomes equal at specified pressures, in other words the material takes an isotropic state. The considered interactions of filtrating material and skeleton frame have shown that the main water filtration occurs directly above perforation holes while the material above blind frame sections does not participate in the process. Due to this a new design of the filtrating element has been developed and it can be used in water intake systems for surface and underground water. The filtrating element consists of the skeleton frame with openings and a filtration covering which is installed on the frame. Water-feeding groove cavities are located on the skeleton frame and they are dispersing from perforation holes in the form of beams. These grooves can have side branches of the second, third and other orders. As beam-like arrangement of grooves creates the shortest flow paths for filtrated water from periphery to frame holes and area of groove cross section exceeds the area of poral holes in water in-take covering by a factor of hundreds, it is possible to ensure free water flow to openings. So such approach makes it possible to obtain high element productivity because practically the whole surface of the water in-take covering is involved in the process. Such filtrating elements can be used in various constructions for filtration of liquid and gas.

Keywords: polyethylene mat, water permeability, isotropy, water feeding grooves

For citation: Klimkov V. T. (2016) Usage of Filters from Fibrous Materials in Ameliorative and Hydro-Technical Construction. *Science & Technique*. 15 (4), 287–291 (in Russian)

В недалеком прошлом при строительстве гидротехнических и мелиоративных сооружений в качестве фильтров применялись в основном песчано-гравийные смеси, сложные и трудоемкие. При сооружении же первых дренажных трубчатых систем столкнулись с проблемой: как предотвратить поступление частиц грунта в полость труб и их закупорку [1, 2]. В глинистых и торфяных грунтах для этого стыки керамических труб обкладывали мхом. В песчаных грунтах такое не помогало – дренаж заиливался.

Поиски и исследовательские работы привели к стекловолоконистым материалам, применяемым для защиты дренажа от механического заиливания. Вначале использовался стеклохолст, изготавливаемый для кровельных работ, тепло- и гидроизоляции [3, 4]. Но при удовлетворительных защитно-фильтрующих свойствах он имел недостаточные прочность на разрыв, гибкость и т. д. В связи с этим разработали и освоили выпуск специальных стеклохолстов ВВ-М (воздушной вытяжки, мелиоративный) и ВВ-АМ (воздушной вытяжки, армированный мелиоративный). Стеклоткани из-за низких фильтрационных свойств оказались непригодными в качестве защитно-фильтрационных материалов (ЗФМ). Вместе с тем стеклохолсты ВВ-М и ВВ-АМ при хороших своих технических свойствах и экономичности в санитарно-гигиеническом отношении неудобны в работе – стеклянная пыль, попадая на кожу человека, вызывает длительные неприятные ощущения.

В западноевропейских странах переход на другие фильтрующие материалы осуществлен не столько из-за санитарно-гигиенических тре-

бований, сколько потому, что использовавшиеся там холсты имели более низкие фильтрационные свойства, обусловленные меньшим диаметром элементарных волокон и меньшей толщиной, чем у применяемых в нашей стране. Поэтому в западных странах (наиболее характерна в этом отношении Германия) осуществлен переход к фильтрам из полимерных и органических натуральных материалов: фильтры из вязкого штапельного волокна, трубы с перлоновыми (полиамидными, аналогами капрона) шнурами; «Фибротекс» с полиэфирными волокнами, трубы с ржаной соломой, кокосовыми волокнами, древесными стружками, древесными волокнами, полипропиленовыми неткаными материалами [5, 6]. В бывшем СССР большая гамма синтетических нетканых материалов испытывалась во ВНИИводополимер (г. Елгава), но широкое практическое использование получили материалы на основе вискозы с лавсаном.

Институтом механики металлополимерных систем (г. Гомель) освоена технология получения волокнистого материала из термопластов, главным образом из полиэтилена высокого давления, который получил название полиэтилен-холст (ПЭ-холст). Особенностью этой технологии является то, что без существенной переналадки оборудования можно получать изделия в широком диапазоне свойств: диаметров элементарных волокон, толщины и ширины полотна, плотности. Кроме того, существенно, что соединение волокон друг с другом осуществляется термической сваркой без связующего. Поэтому, используя, например, мароч-

ный ассортимент полиэтилена, допущенного к применению в системах водоснабжения, для контакта с пищевыми продуктами, в медицине и т. д., можно получать изделия, имеющие эти же области применения. Налажен выпуск рулонного материала из ПЭ-холста, фильтрующих муфт, пластин.

Поскольку фильтрационная обкладка дренажных труб не только защищает их от заиливания, но и повышает осушительное действие, уменьшая сопротивление потоку воды из грунта в полость труб, в определенных условиях с этой целью специально рекомендуют увеличивать толщину данной обкладки. При этом происходит своеобразное увеличение водоприемной поверхности дрены (диаметр дрены или скважины вместе с обсыпкой В. В. Ведерников назвал эффективным). Для этого используют сыпучие материалы или специальные фильтрующие элементы.

Попытки объяснить увеличение расхода из обернутых каркасов по сравнению с необернутыми увеличением эффективного диаметра на толщину обертки не подтверждаются расчетом. Так, при наружном диаметре 42 мм и толщине обертки 1 мм увеличение диаметра от 42 до 44 мм должно было увеличить расход только на 1 %. Фактическое же увеличение достигает 35–60 %. Объясняется это, с одной стороны, предотвращением блокирования входных отверстий частицами грунта и созданием более благоприятных условий входа. С другой стороны, через фильтрующий материал проходит часть пылеватых и глинистых частиц из прифильтровой зоны, создавая область повышенной водопроницаемости.

Первые опыты автора статьи с фильтрующими материалами показали, что проницаемость их существенно изменяется под действием нагрузки [7]. Изменение коэффициента фильтрации под нагрузкой имеет быстро затухающий характер, 90 % общего снижения этого коэффициента происходит при давлении до 0,2 МПа (рис. 1). Объясняется это сближением отдельных волокон между собой на первом этапе, их более плотной укладкой. Пористость при этом резко уменьшается. С увеличением нагрузки начинают деформироваться уже сами волокна, что требует больших усилий. Однако пористость и соответственно коэффи-

циент фильтрации уже изменяются не так интенсивно.

Результаты опытов продольной фильтрации в образцах ПЭ-холста показали, что, как и при нормальной фильтрации, в этом случае скорость фильтрации линейно зависит от напора, а под нагрузкой графики имеют затухающий характер. Из опытов, проведенных на образцах из одного и того же материала, следует, что без нагрузки поперечная проницаемость более чем в два раза превосходит продольную, но при сжатии поперечная проницаемость уменьшается более интенсивно, чем продольная. При давлении 60 кПа коэффициент поперечной фильтрации становится вдвое меньше начального, в то время как продольный снижается только на 10 %, а при давлении около 70 кПа проницаемость в поперечном и продольном направлениях выравнивается, т. е. материал в фильтрационном отношении становится изотропным.

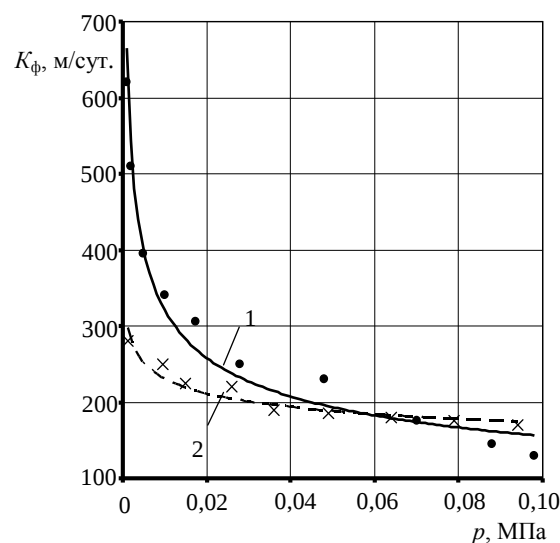


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента фильтрации волокнистого материала от нагрузки при фильтрации: 1 – поперечной; 2 – продольной

Fig. 1. Diagrams for dependence of fibrous material filtration coefficient on loading during filtration: 1 – lateral loading; 2 – longitudinal loading

Поскольку поверхностные воды, отводимые в дренаж, переносят значительное количество взвесей, которые могут заилить полости дрена, ставится задача задержания их различными фильтрующими устройствами. Известно много видов устройств для решения данного вопроса, но сказать, что проблема решена оптималь-

ным образом, нельзя. Связано это в первую очередь со сложными, жесткими, порой антагонистическими требованиями, предъявляемыми к таким сооружениям [8]. Вместе с тем все эти конструкции рассчитаны на пропуск вод со взвесями определенного состава. Однако в зависимости от гидрографа притока воды меняются и состав взвесей, и транспортирующая способность трубопровода. Так, при малой приточности с водой поступают мелкие взвеси, а при увеличении расхода и скоростей потока увлекаются все более крупные частицы. Но также увеличивается транспортирующая способность отводящего трубопровода, и в случае установки мелкопористого фильтрующего элемента он будет закольматирован. При установке же крупнопористого фильтрующего элемента возникает опасность заиливания трубопровода частицами, проходящими через фильтр, но выпадающими в осадок при малых скоростях потока в самом трубопроводе.

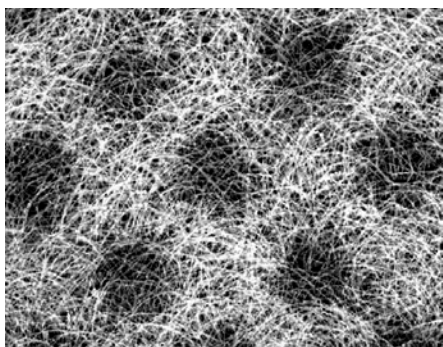


Рис. 2. Фотография полиэтилен-холста, бывшего в эксплуатации

Fig. 2. Photo of the used polyethylene mat

Рассмотренные взаимодействия фильтрующего материала и опорного каркаса в виде перфорированной трубы выявили, что основная фильтрация воды происходит непосредственно над перфорационными отверстиями, в то время как материал над глухими участками каркаса в работе не участвует (рис. 2). В связи с этим разработана новая конструкция фильтрующего элемента, который может использоваться в водозаборах поверхностных и подземных вод и других устройствах очистки жидкостей и газов от механических частиц.

Фильтрующий элемент (рис. 3) состоит из опорного каркаса с входными отверстиями и

установленного на нем фильтрационного покрытия. Между ними на опорном каркасе выполнены водоподводящие канавки (полости), расходящиеся в виде лучей от перфорационных отверстий. Эти канавки могут иметь боковые ответвления второго 5, третьего 6 и т. д. порядков [9].

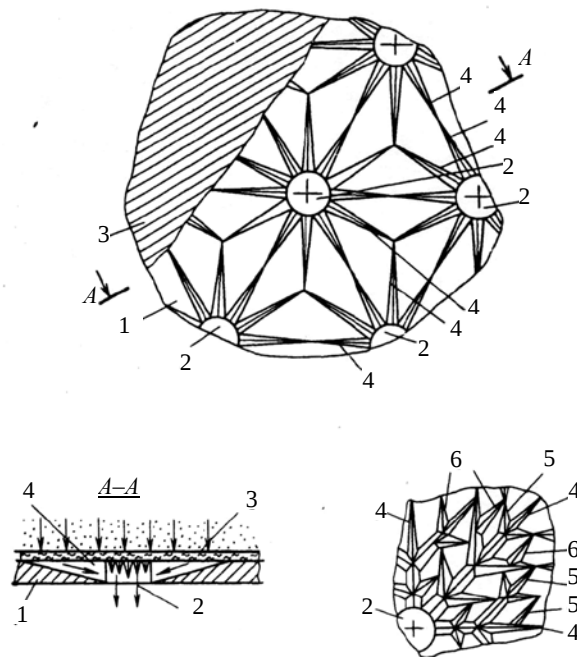


Рис. 3. Фильтрующий элемент: 1 – опорный каркас; 2 – входное отверстие; 3 – фильтрационное покрытие; 4 – водоподводящие канавки; 5, 6 – водоподводящие канавки второго и третьего порядков

Fig. 3. Filtrating element: 1 – skeleton frame; 2 – input opening; 3 – filtration covering; 4 – water feeding grooves; 5, 6 – water feeding grooves of the second, third order

Такой фильтрующий элемент может изготавливаться, например, одновременной штамповкой отверстий и канавок из листа металла, используемого как опорный каркас. Возможно устройство канавок и на фильтрационном покрытии в соответствии с размещением отверстий на опорном каркасе. Если же в качестве опорного каркаса использовать пластмассовую трубу, то канавки можно формовать на ней горячим штампом.

Разветвленная сеть канавок может покрывать всю поверхность каркаса. Поскольку лучеобразное расположение канавок создает кратчайшие пути потоку профильтрованной воды от периферии к отверстиям каркаса, а площадь

поперечного сечения канавок в сотни раз превосходит площадь поровых ходов в водоприемном покрытии, обеспечиваются свободное движение воды к отверстиям и тем самым высокая производительность элемента, поскольку в работу вовлекается почти вся поверхность водоприемного покрытия. Такие фильтрующие элементы могут использоваться в различных конструкциях фильтрации жидкостей и газов. Перспективны направления применения волокнистых фильтрационных материалов при осушении и укреплении грунтов, рыбозащите, в сельском хозяйстве, гидротехническом и гражданском строительстве. Это создание ленточных дрен и слоистых панелей, крепление откосов земляных сооружений и пр.

ВЫВОДЫ

1. Волокнистые материалы на основе полимеров позволяют создавать новые высокоэффективные конструкции фильтрационных элементов для различных областей применения [9].

2. Дальнейшее совершенствование гидротехнических сооружений и мелиоративных систем должно включать новые фильтрующие конструкции для предотвращения их выхода из строя и увеличения долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубец, В. М. Исследование заиляемости гончарного дренажа / В. М. Зубец, А. И. Мурашко // Осушение и использование торфяно-болотных почв: сб. Минск: Сельхозиздат БССР, 1963. С. 62–88.
2. Мурашко, А. И. Защита дренажа от заиления / А. И. Мурашко, Е. Г. Сапожников. Минск: Ураджай, 1978. 168 с.
3. Svihla, V. Drenazni Filtry / V. Svihla. Praha, 1980. 140 p.
4. Эггельсман, Р. Руководство по дренажу / Р. Эггельсман; пер. с нем. М.: Колос, 1984. 248 с.
5. Stein, H. Modellexperimente fur Entwässerungswirkung von Dränrohren in Abhängigkeit von ihrer Größe und Perforation / H. Stein, R. Dannowski, J. Quast // Zeitschrift fuer Kulturtechnik und Flurbereinigung, 1990. P. 281–393.
6. Collins, H. J. Pruffing von Drän Filterstoffen / H. J. Collins, H. Karge // Wasser und Boden. 1978. Vol. 30, No 10. P. 266.

7. Воронцов, Б. А. Фильтрационные характеристики волокнисто-пористого полиэтилена / Б. А. Воронцов, В. Т. Климов // Новые конструкции мелиоративных систем и сооружений на них: сб. статей. Минск, 1982. С. 163–171.
8. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления / Н. Г. Пивовар [и др.]. Киев: Нац. акад. наук Украины, Ин-т гидромеханики, 2000. 332 с.
9. Фильтрующий элемент: пат. 1599049 СССР: МПК В01Д 25/00 / В. Т. Климов, А. П. Майорчик, И. М. Шаталов; дата публ.: 15.10.1990.

Поступила 17.02.2016

Подписана в печать 18.04.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Zubets V. M., Murashko A. I. (1963) Investigations on Silting of Tile Drainage. *Osushenie i Ispolzovanie Torfiano-Bolotnykh Pochv. Sbornik* [Drainage and Usage of Peat-Bog Soils]. Minsk, Publishing House "Selkhozdat BSSR", 62–88 (in Russian).
2. Murashko A. I., Sapozhnikov E. G. (1978) *Protection of Drainage Against Silting*. Minsk, Publishing House "Uradzhay". 168 (in Russian).
3. Svihla V. (1980) *Drenazni Filtry*. Praha. 140.
4. Eggelsman R. (1984) *Guide for Drainage*. Moscow, Kolos. 248 (in Russian).
5. Stein H., Dannowski R., Quast J. (1990) Modellexperimente fur Entwässerungswirkung von Dränrohren in Abhängigkeit von ihrer Größe und Perforation. *Zeitschrift fuer Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 281–393 (in German).
6. Collins H. J., Karge H. (1978) Pruffing von Drän Filterstoffen. *Wasser und Boden*, 30 (10), 266 (in German).
7. Vorontsov B. A., Klimkov V. T. (1982) Filtration Characteristics of Fibrous and Porous Polyethylene. *Novye Konstruktsii Meliorativnykh Sistem i Sooruzhenii na Nkh. Sb. Statei* [New Designs of Melioration Systems and Constructions. Collected Papers]. Minsk, 163–171 (in Russian).
8. Pivovarov N. G., Bugai N. G., Fridrikhson V. L., Krivonog A. I., Krivonog V. V. (2000) *Drainage with Fibrous Filters for Territory Protection Against Under-Flooding*. Kiev: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Hydromechanics. 332 (in Russian).
9. Klimkov V. T., Mayorchik A. P., Shatalov I. M. (1990) Filtrating Element. Patent USSR No 1599049.

Received: 17.02.2016

Accepted: 18.04.2016

Published online: 28.07.2016

Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий»

Кандидаты техн. наук, доценты П. М. Богославчик¹⁾, Г. Г. Круглов¹⁾, Н. Н. Линкевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. На основании теории надежности дано определение надежности дамб обвалования шламохранилищ, приведены характеристики надежности и их анализ. Перечислены показатели качества грунтовых дамб, которые подразделяются на две группы: показатели назначения и показатели конструктивной надежности. Выполнен краткий анализ всех возможных причин возникновения аварий на грунтовых плотинах и дамбах, на основании которого выделены одиннадцать основных объектов диагностирования применительно к дамбам шламохранилищ. Для оценки степени риска возникновения аварий на шламохранилищах ОАО «Беларуськалий» проанализированы все возможные причины аварий и вероятность их появления. Констатируется, что нарушение работы дамб возможно, как правило, при нарушении правил эксплуатации. Выделены основные параметры состояния шламохранилища, которые необходимо контролировать в процессе эксплуатации постоянно. Проанализированы результаты наблюдений за шламохранилищами и расчеты устойчивости откосов дамб для случаев нормальной эксплуатации (основной расчетный случай) и нарушения работы противифльтрационных устройств (особый расчетный случай). Поскольку в особом случае коэффициент запаса устойчивости близок к 1,0, для всех расчетных сечений определено предельное положение кривой депрессии. Рекомендуется постоянный контроль ее положения, и в случае достижения его предельного значения – принятие мер по его снижению. На основании анализа всех факторов приводятся итоговые экспертные оценки вероятности возникновения аварий на исследуемых дамбах шламохранилищ 4-го РУ ОАО «Беларуськалий». Сделан вывод о малой степени риска их разрушения.

Ключевые слова: дамба, откос, прочность, авария, параметры, кривая депрессии, коэффициент запаса, экспертные оценки

Для цитирования: Богославчик, П. М. Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий» / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 292–297

Assessment of Reliability and Risk Degree for Accident Initiation at Slime Storages of 4th Mining Administration, JSC “Belaruskali”

P. M. Bohaslauchyk¹⁾, G. G. Kruglou¹⁾, N. N. Linkevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University

Abstract. Definition of reliability for dams of slime storage embankment is given on the basis of reliability theory and characteristics of reliability and their analysis are presented in the paper. The paper specifies qualitative indices for earth dams which are subdivided in two groups: applicability factors and structural reliability factors. A short analysis of all possible causes for accident initiation at earth dams has been made and the analysis has permitted to pinpoint eleven main objects for diagnosis for slime storage dams. In order to assess risk degree of accident initiation at JSC “Belaruskali” slime storages all possible

Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-98-08
fes@bntu.by

Address for correspondence

Bohaslauchyk Petr M.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-98-08
fes@bntu.by

causes of emergency cases and their probability of occurrence have been analyzed in the paper. The paper acknowledges the fact that dam malfunction is possible, as a rule, due to violation of operational rules and regulations. Main parameters of slime storage state which are to be controlled regularly in the process of its operation have been noted in the paper. Observation results over slime storages, calculations of dam slope stability for normal operation (a principal calculation case) and operating irregularities in water seals (a special calculation case). As a stability margin factor is close to 1.0 for a special calculation case, an extreme position of depression curve has been determined for all design sections. It has been recommended to carry out a constant control over its position, and in the case when it reaches its peak value it is necessary to undertake appropriate measures in order to reduce its value. Final expert estimations on probability of accident initiation at the investigated slime storage dams of the 4th Mining Administration, JSC "Belaruskali" have been prepared on the basis of the analysis comprising all the required factors. A conclusion has been made about low risk degree of their destruction.

Keywords: dam, slope, strength, accident, parameters, depression curve, safety factor, expert estimation

For citation: Bohaslauchyk P. M., Kruglou G. G., Linkevich N. N. (2016) Assessment of Reliability and Risk Degree for Accident Initiation at Slime Storages of 4th Mining Administration, JSC "Belaruskali". *Science & Technique*. 15 (4), 292–297 (in Russian)

Введение

Шламохранилища сильвинитно-обогатительной фабрики (СОФ) 4-го рудоправления (РУ) включают шламохранилища северной (53,00 га) и южной (103,65 га) карт, шламорассолопроводы и три насосные станции оборотных рассолов (стационарную и две передвижные). Полезная емкость шламохранилищ СОФ 4-го РУ создана за счет строительства ограждающих грунтовых дамб, на гребне которых имеется эксплуатационный проезд шириной от 6 до 8 м для проезда автотранспорта в случае возникновения аварийной ситуации. Общая протяженность дамб шламохранилищ составляет: северная карта – 2,85 км, южная карта – 4,65 км.

Эксплуатационная надежность ограждающих дамб шламохранилищ

Надежность дамбы обвалования определяется как свойство дамбы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданную функцию в заданных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [1]. С позиции теории надежности систем надежность дамбы можно оценить следующими характеристиками: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и живучестью [2]. В настоящее время срок службы ограждающих дамб не нормирован, однако его можно принимать, как для плотин 1-го класса, равным 100 годам [3]. Перечисленные характеристики надежности являются основными понятиями математической теории надежности и определяются путем статистической обработки результатов наблюдений.

Об эксплуатационной надежности ограждающей дамбы можно судить, сравнивая фактические значения параметров качества с назначенными по условиям надежности. Параметры или показатели качества грунтовых дамб, характеризующие эксплуатационные требования, можно разделить на две группы: показатели назначения и показатели конструктивной надежности. К показателям назначения грунтовых дамб относятся значения максимального и минимального напоров, геодезические отметки гребня дамбы и отметки гребня противофильтрационного экрана. Грунтовая дамба в целом, ее отдельные элементы и конструкции в процессе эксплуатации должны соответствовать следующим показателям конструктивной надежности: общей и местной прочности, общей и местной устойчивости, общей и местной фильтрационной прочности, трещино-, морозо- и коррозионной стойкости, температурной устойчивости и биостойкости.

В Республике Беларусь за 47 лет эксплуатации дамб шламохранилищ ОАО «Беларуськалий» не было ни одного отказа. Не известна такая статистика и за рубежом. В связи с отсутствием достаточной статистики отказов ограждающих дамб шламохранилищ представляют интерес сведения о причинах аварий и повреждений грунтовых плотин, которые по конструкции и характеру работы практически полностью соответствуют дамбам шламохранилищ. В [4, 5] приводятся данные ряда авторов (Мидлбрук (США), Грунер (Швейцария), Такаси (Япония)), которые обобщили причины аварий 30–40 грунтовых плотин. По сведениям этих авторов, в качестве основных причин аварий плотин были: недостаточная пропускная

способность водосбросных сооружений, что привело к переливу воды через гребень плотин (30–38 %); фильтрационные деформации тела плотин и грунтов основания (33–56 %); оползание и деформации откосов (15 %); волновые воздействия (5 %); землетрясения (6–34 %); прочие (биоповреждения, воздействие льда) (4–5 %). Наиболее полные исследования по выявлению статистики аварий грунтовых плотин выполнены под руководством М. И. Гогоберидзе [6, 7]. На основе анализа аварий получены значения интенсивности аварий λ в зависимости от времени эксплуатации t грунтовых плотин, приведенные в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наибольшая интенсивность отказов наблюдается в первые пять лет эксплуатации грунтовых плотин и особенно в первый год, когда проявляются все недостатки изысканий и производства работ. Через 10–15 лет эксплуатации отказы будут возникать на четырех-пяти плотинах из каждой тысячи находящихся в эксплуатации. Затем рост числа отказов придется на период после 50–60 лет эксплуатации, что связано с процессом старения и износа материалов. Кроме того, отмечается повышенная аварийность низких (до 15–20 м) плотин, что является следствием недостаточной тщательности их проектирования, строительства и особенно эксплуатации [8].

Таблица 1

Изменение интенсивности аварий грунтовых плотин в зависимости от времени эксплуатации
Changes in intensity of earth dam accidents according to in-service time

Время эксплуатации, год	До 1	1–3	3–5	5–10	10–20	20–50	50–60
Интенсивность аварии	0,159	0,100	0,026	0,011	0,005	0,004	0,019

На основе анализа конструкций грунтовых плотин и ограждающих дамб, их аварий и повреждений выделены 11 основных объектов диагностирования: верховой откос и его крепление; низовой откос и его крепление; гребень и его крепление; противофильтрационное устройство в теле дамбы; противофильтрационное устройство в основании дамбы; дренажное устройство; ливнеотводящие и дренажные каналы; зона сопряжения с бетонным сооружением; зона сопряжения с основанием; зона влияния

дамбы со стороны шламохранилища; зона влияния дамбы со стороны ограждаемой территории. Каждый объект диагностирования грунтовой дамбы в процессе эксплуатации характеризуется определенной совокупностью параметров и качественных признаков технического состояния. Параметры (деформации, фильтрационный расход и др.) измеряются с помощью соответствующих средств измерений, а качественные признаки (трещины, просадки, выход фильтрационного потока и др.) регистрируются визуально. При оценке состояния дамбы для каждого объекта диагностирования необходимо установить нормативные значения контролируемых параметров, а также дать перечень качественных признаков, характеризующих отклонение от нормального состояния. Непригодность к нормальной эксплуатации определяется путем сравнения с номинальным значением измеряемого параметра, а непригодность к эксплуатации – сравнением с предельным значением параметра.

Оценка степени риска возникновения аварий на шламохранилищах СОФ 4-го РУ ОАО «Беларуськалий»

В связи с отсутствием аварий на шламохранилищах ОАО «Беларуськалий» за все годы их эксплуатации, а также из-за отсутствия методики расчета степени риска разрушения дамб шламохранилищ оценка степени риска возникновения гидродинамической аварии может быть выполнена на основании обследования экспертами шламохранилищ и рассмотрения всех возможных факторов, из-за которых может произойти разрушение дамб шламохранилища. При оценке степени риска разрушения дамб шламохранилища проанализированы все причины, по которым может произойти разрушение, оценена вероятность появления таких ситуаций по каждой из причин и их совокупности. На основании данного анализа установлен интегральный показатель степени риска разрушения ограждающих дамб. При анализе учитывались результаты изучения причин разрушения дамб в республике, а также аналогичные результаты, полученные за рубежом и опубликованные в литературных источниках. При этом принималось во внимание, что существу-

ющие методы расчета плотин и дамб разработаны в основном по результатам изучения причин разрушения таких сооружений.

В общем случае надежность дамб можно установить по группе показателей, определяемых инженерными расчетами, а также по группе показателей, которые невозможно определить расчетным путем и которые оцениваются по аналогии с сооружениями, где наблюдались нарушения их нормальной работы или разрушения. Первой по значимости причиной разрушения дамб является недостаточная прочность грунтов для принятой конструкции дамб. Выполненные расчеты показали, что при расчетных значениях прочностных характеристик грунтов основания общая устойчивость дамб шламохранилищ обеспечивается. Для принятых параметров дамб на таких грунтах основания не было случаев разрушения в результате потери общей устойчивости.

Второй по значимости причиной разрушения дамб является обрушение откосов, которое может произойти при недостаточной прочности грунтов основания и грунтов тела дамб. Проведенные вариантные расчеты устойчивости откосов и связанные с ними фильтрационные расчеты показали, что устойчивость дамб шламохранилищ при принятых значениях параметров их поперечного сечения и проектном режиме эксплуатации обеспечена.

Следующая по значимости причина разрушения дамб – перелив воды через гребень. На дамбах шламохранилища эта причина исключена, так как по режиму эксплуатации быстрое заполнение и переполнение его невозможны. Отсутствие водосборной площади исключает переполнение шламохранилища в результате природных явлений (ливни, сильные снегопады). Конструкция креплений откосов и размеры шламохранилищ (небольшая длина разгона волн) исключают разрушение откосов и как следствие – и самих дамб в результате воздействия волн. Отсутствие в шламохранилищах сплошного ледового покрова в зимний период, а также резкого колебания уровней в это время исключает возможное повреждение откосов по данным причинам.

Анализ причин возможного разрушения дамб шламохранилищ, которые нельзя оценить результатами строгих инженерных расчетов, выполняется по опыту эксплуатации дамб ана-

логичной конструкции. Разрушение возможно из-за разжижения грунтов тела дамбы. Однако в республике не было зафиксировано ни одного случая разрушения дамб и земляных плотин по этой причине. Так как в дамбах шламохранилищ устроен экран и, кроме того, образуется хороший экран из шламов и не происходит насыщения тела дамб водой, вероятность такого разрушения чрезвычайно низкая.

Появление сосредоточенных путей фильтрации в подпорном сооружении может привести к его разрушению. Одной из причин возникновения сосредоточенных путей фильтрации является трещинообразование в теле дамбы в результате неравномерной осадки. Так как дамбы шламохранилищ построены на достаточно прочном основании и осадка их в результате уплотнения грунтов основания незначительная, образование трещин в теле дамб из-за неравномерных осадок исключено. В случае подработки территории под дамбами шламохранилища потребуется дополнительно оценить устойчивость дамб (их возможную осадку и ее неравномерность) и разработать мероприятия по обеспечению их устойчивости.

Сосредоточенные пути фильтрации могут возникнуть в основании дамбы при наличии не обнаруженных в процессе изысканий прослоев хорошо проницаемых грунтов в слабопроницаемых грунтах основания. В таких случаях при создании напора в нижнем бьефе появляются грифоны и вынос грунта фильтрационным потоком. Эти явления, как правило, не приводят к катастрофическим последствиям, так как при своевременном обнаружении можно предусмотреть мероприятия, обеспечивающие устойчивость дамб. Причиной образования сосредоточенных путей фильтрации могут быть ходы землеройных животных. Нормальная эксплуатация дамб и состав содержимого шламохранилищ делают эту причину их разрушения маловероятной. Сосредоточенные пути фильтрации в теле дамб возможны также в результате интенсивного влагопереноса к фронту промерзания и образования ледяных прослоек, которые после оттаивания могут явиться причиной разрушения дамб. Однако низкое положение кривой депрессии в дамбах шламохранилища делает эту причину маловероятной.

В случае расположения шламорассолопроводов на гребне дамб при их разрыве возможен

локальный размыв откоса. Поэтому необходим постоянный контроль состояния шламорасслопопроводов для исключения этой причины.

Разрушения дамб по причинам рассматриваемой группы в большинстве случаев происходили из-за плохой эксплуатации. При квалифицированной эксплуатации своевременное обнаружение любого отклонения от нормальной работы позволяет его устранить. Основными контролируемыми параметрами состояния шламохранилищ СОФ 4-го РУ являются: уровень заполнения шламохранилищ, положение кривой депрессии в теле дамбы (верхняя огибающая фильтрационного потока), отметка гребня ограждающих дамб, состояние верхового и низового откосов дамб. Предельно допустимый подъем кривой депрессии (контроль в пьезометре) в шламохранилищах СОФ 4-го РУ составляет 1,0 м в месяц. Фактически в период наблюдения подъем кривой депрессии был в пределах от 0,1 до 0,4 м. Размывы и промоины верхового и низового откосов дамб шламохранилищ отсутствуют.

За период наблюдения превышения проектных уровней заполнения шламохранилищ СОФ 4-го РУ не наблюдалось. Контрольные наблюдения за состоянием шламохранилищ СОФ 4-го РУ проводились с начала их заполнения и ведутся в настоящее время. Данные анализа замера уровня воды в пьезометрах показали отсутствие резких скачков воды в них за весь период наблюдения. Контрольные замеры отметок поверхностных марок подтверждают соответствие отметок гребня дамб проектным отметкам и отсутствие оседания гребня дамб в настоящее время.

Визуальный осмотр дамб шламохранилища при его заполнении позволяет выявить в начальной стадии участки повышенной фильтрации на низовых откосах дамб. Для снижения кривой депрессии на дамбе производится шламование верхового откоса шламами, что уменьшает фильтрацию. Фильтраций на низовых откосах шламохранилищ СОФ 4-го РУ не наблюдалось. Анализ наблюдений за шламохранилищами подтвердил их эффективность для своевременного обнаружения и устранения нарушений, которые могут вызвать возникновение аварийных ситуаций в дамбах. На основании проектных и фактических поперечных

профилей построенных дамб, а также с учетом инженерно-геологических данных грунтов, слагающих дамбы и их основания, выполнены расчеты устойчивости откосов дамб, которые показали, что и в нормальных, и в особых условиях эксплуатации (при разрушении противофильтрационного экрана) откосы дамб устойчивы [9, 10].

Для реконструируемой дамбы Д4 дополнительно выполнены расчеты устойчивости низового и верхового откосов для случая нормальных условий эксплуатации, когда экран из полиэтиленовой пленки не нарушен, и для особых условий эксплуатации, когда экран поврежден, не выполняет своей функции и не оказывает влияния на положение кривой депрессии в теле ограждающей дамбы. Анализ полученных результатов показывает, что верховой откос дамбы устойчив. Низовой откос дамбы для нормальных условий эксплуатации также устойчив, а значения коэффициентов запаса больше допустимых, которые для 3-го класса равны 1,15. Коэффициент запаса устойчивости низового откоса для особых условий эксплуатации равен 1,00, т. е. критическому значению. Положение кривой депрессии в теле дамбы, соответствующее этому случаю, является предельно допустимым. Если в процессе эксплуатации дамбы уровни грунтовых вод в ней достигнут этого значения, то во избежание опасности обрушения низового откоса необходимо снизить уровень рассола в шламохранилище. Ознакомление с проектом, обследование в натуре дамб шламохранилищ, выполненные расчеты устойчивости, системный анализ возможных причин разрушения дамб аналогичной конструкции свидетельствуют о малой степени риска их разрушения и, как следствие, возникновения гидродинамической аварии.

ВЫВОД

На основании анализа конструкции грунтовых плотин и дамб, условий их работы и имеющих место аварий и повреждений выявлены и систематизированы все возможные причины возникновения аварий в особых условиях эксплуатации, когда экран разрушен и не выполняет своих функций, низовой откос реконструируемой дамбы находится в критическом

состоянии, коэффициент запаса устойчивости равен единице. Для этого случая расчетами определены минимально допустимые уровни грунтовых вод в теле дамбы, а сами уровни в процессе эксплуатации шламохранилища (южная карта) должны постоянно контролироваться. Не следует допускать повышения кривой депрессии до предельно допустимых значений. Итоговые экспертные оценки вероятности возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий» установлены: северная карта – 0,01 %, южная карта – 0,05 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002–89. Введ. 01.07.90. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
2. Голикевич, Т. А. Прикладная теория надежности / Т. А. Голикевич. М.: Высш. шк., 1985. 168 с.
3. Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. М.: Колос, 1974. 279 с.
4. Малаханов, В. В. Техническая диагностика грунтовых плотин / В. В. Малаханов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 120 с.
5. Ничипорович, А. А. Плотины из местных материалов / А. А. Ничипорович. М.: Стройиздат, 1973. 320 с.
6. Гогоберидзе, М. И. Научные основы постановки натурных наблюдений на плотинах / М. И. Гогоберидзе. Тбилиси: Мецниереба, 1980. 70 с.
7. Обобщение данных статистического анализа аварий и инцидентов в аспекте надежности плотин / М. И. Гогоберидзе [и др.] // Сообщения АН Груз. ССР. 1977. Т. 86, № 3. С. 681–684.
8. Schwitter, N. Statistische Sicherheit der Talsperren / N. Schwitter // Wasser, Energia, Laft. 1976. Vol. 68, No 5.
9. Исследование устойчивости грунтовых дамб по объекту «Реконструкция карт шламохранилища 4-го РУ с получением дополнительной емкости»: заключ. отчет. Минск, 2005.

10. Исследование устойчивости ограждающих дамб на слабом основании на объекте «Реконструкция карт шламохранилища 4-го РУ с получением дополнительной емкости. II очередь»: заключ. отчет. Минск, 2008.

Поступила 21.12.2015

Подписана в печать 22.02.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. State Standard 27.002–89. Industrial Product Dependability. Basic Concepts. Terms and Definitions. Moscow, Publishing House of Standards, 1990. 37 (in Russian).
2. Golinkevich T. A. (1985) *Applied Reliability Theory*. Moscow, Vysshaya Shkola. 168 (in Russian).
3. Mirtskhulava Ts. E. (1974) *Reliability of Hydro-Reclamation Facilities*. Moscow, Kolos. 279 (in Russian).
4. Malakhanov V. V. (1990) *Technical Diagnostics of Earth Dams*. Moscow, Energoatomizdat. 120 (in Russian).
5. Nikiporovich A. A. (1973) *Dams Built on the Basis of Local Materials*. Moscow, Stroyizdat. 320 (in Russian).
6. Gogoberidze M. I. (1980) *Scientific Basis for Field Studies of Dams*. Tbilisi: Publishing House "Metsniereba". 70 (in Russian).
7. Gogoberidze M. I., Kakauridze R. G., Mikashvili Iu. N., Mirtskhulava D. Ts. (1977) *Compilation of Analysis Data on Breakdowns and Malfunctions in Respect of Dam Reliability*. *Soobshcheniia Akademii Nauk Gruzinskoi SSR* [Report of Academy of Sciences of Georgian Soviet Socialist Republic], 86 (3), 681–684 (in Russian).
8. Schwitter N. (1976) *Statistische Sicherheit der Talsperren*. *Wasser, Energia, Laft*, 68 (5).
9. Investigations on Sustainability of Earth Dams for the Following Object: "Reconstruction of Charts for 4 PY-Sludge Depository with Obtaining Additional Capacity": Final Report. Minsk, 2005.
10. Investigations on Sustainability of Embankments on Weak Foundation for the Following Object: "Reconstruction of Charts for 4 PY-Sludge Depository with Obtaining Additional Capacity. 2nd Stage": Final Report. Minsk, 2008.

Received: 21.12.2015

Accepted: 22.02.2016

Published online: 28.07.2016

Поровая структура дорожного бетона

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, магистрант В. В. Гиринский¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾, докт. хим. наук, проф. В. Н. Яглов¹⁾,
канд. техн. наук С. С. Будниченко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Из многочисленных классификаций структур бетона выделяются три основных типа: микроструктура – структура цементного камня; мезоструктура – структура цементно-песчаного раствора в бетоне; макроструктура – двухкомпонентная система, состоящая из раствора и крупного заполнителя. Для каждой из перечисленных структур характерны свои особенности, связанные с условиями их образования. Так, микроструктура цементного камня может быть охарактеризована такими структурными составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важные технологические факторы, влияющие на формирование микроструктуры цементного камня, – химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. В зависимости от соотношения этих факторов формируется конкретная микроструктура цементного камня. Цементный камень – капиллярно-пористое тело, состоящее из различных твердых фаз, представленных преимущественно субмикрорекристаллами коллоидной степени дисперсности, способными адсорбционно, осмотически и структурно удерживать (связывать) некоторое количество влаги. Защита дорожного бетона как капиллярно-пористого тела – одна из актуальных задач. Она решается методами первичной и вторичной защиты. Методы первичной защиты используются на стадии проектирования, приготовления и укладки бетона. Методы вторичной защиты – на стадии эксплуатации бетонного дорожного покрытия. В статье рассмотрены структуры твердой фазы бетона и характеристики его порового пространства. Приведены причины возникновения пор, а также их форма, размеры и расположение в объеме бетона. Наибольшую опасность для дорожного бетона представляют проникновение в него агрессивной жидкости и влагоперенос в затвердевшем бетоне. Водопроницаемость бетона характеризует его коэффициент фильтрации, который зависит от времени и условий твердения, а также от условий эксплуатации.

Ключевые слова: структура бетона, цементный камень, поровое пространство, влагоперенос, проницаемость

Для цитирования: Поровая структура дорожного бетона / М. К. Пшембаев [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 298–307

Porous Structure of Road Concrete

М. К. Pshembaev¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾, V. N. Yaglov¹⁾, S. S. Budnichenko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Having a great number of concrete structure classifications it is recommended to specify the following three principal types: microstructure – cement stone structure; mesostructure – structure of cement-sand mortar in concrete; macrostructure – two-component system that consists of mortar and coarse aggregate. Every mentioned-above structure has its own specific features which are related to the conditions of their formation. Thus, microstructure of cement stone can be characterized by such structural components as crystal intergrowth, tobermorite gel, incompletely hydrated cement grains and porous space.

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

The most important technological factors that influence on formation of cement stone microstructure are chemical and mineralogical cement composition, its grinding fineness, water-cement ratio and curing condition. Specific cement stone microstructure is formed due to interrelation of these factors. Cement stone is a capillary-porous body that consists of various solid phases represented predominantly by sub-microcrystals of colloidal dispersion. The sub-microcrystals are able adsorptively, osmotically and structurally to withhold (to bind) some amount of moisture. Protection of road concrete as a capillary-porous body is considered as one of the topical issues. The problem is solved with the help of primary and secondary protection methods. Methods of primary protection are used at the stage of designing, preparation and placing of concrete. Methods of secondary protection are applied at the operational stage of road concrete pavement. The paper considers structures of concrete solid phase and characteristics of its porous space. Causes of pore initiation, their shapes, dimensions and arrangement in the concrete are presented in the paper. The highest hazard for road concrete lies in penetration of aggressive liquid in it and moisture transfer in the cured concrete. Water permeability of concrete characterizes its filtration factor which depends on curing time and conditions and operational conditions as well.

Keywords: concrete structure, cement stone, porous space, moisture transfer, permeability

For citation: Pshembaev M. K., Girinsky V. V., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Budnichenko S. S. (2016) Porous Structure of Road Concrete. *Science & Technique*. 15 (4), 298–307 (in Russian)

Введение

Области применения тяжелого бетона в настоящее время непрерывно расширяются. Наиболее объемная – отрасль дорожного строительства. Автомобильные дороги и мосты эксплуатируются в условиях интенсивного механического воздействия, ультрафиолетового излучения, воды, знакопеременных температур с замораживанием и высушиванием, химической агрессии и др. Сохранение стабильных эксплуатационных свойств на весь установленный период жизни дорожного бетона является чрезвычайно актуальным. Защиту от коррозии автомобильных дорог и мостов осуществляют способами первичной и вторичной защиты. К способам первичной защиты относятся:

- проектирование эффективных составов бетонов;
- применение химических добавок, повышающих качество бетона в процессе его получения и укладки;
- снижение проницаемости бетона технологическими методами;
- устранение усадочных трещин.

Вторичная защита – это мероприятия по защите поверхности бетонных изделий от воздействия агрессивной среды путем нанесения пропиточных составов, а также ряд других мероприятий [1]. Для использования различных методов защиты бетона необходимо рассматривать его структуру и поведение как капиллярно-пористого тела.

Общая характеристика твердой фазы бетона

Из многочисленных классификаций структур бетона выделяют три основных типа [2–5]: микроструктура – структура цементного камня;

мезоструктура – структура цементно-песчаного раствора в бетоне; макроструктура – двухкомпонентная система, состоящая из раствора и крупного заполнителя. Для каждой из перечисленных структур характерны свои особенности, связанные с условиями их образования. Так, микроструктура цементного камня может быть охарактеризована такими структурными составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важные технологические факторы, влияющие на формирование микроструктуры цементного камня, – химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. В зависимости от соотношения этих факторов формируется конкретная микроструктура цементного камня [2]. Цементный камень – капиллярно-пористое тело, состоящее из различных твердых фаз, представленных преимущественно субмикроструктурами коллоидной степени дисперсности, способными адсорбционно, осмотически и структурно удерживать (связывать) некоторое количество влаги.

В [6, 7] все продукты гидратации обычно называются цементным гелем. Однако такое представление о строении продуктов гидратации цемента весьма условное и не позволяет раскрыть природу аномальных свойств цементного камня, например усадки и ползучести. Сами авторы термина «цементный гель» признают его условность и неопределенность из-за физической и химической неоднородности продуктов гидратации цемента.

Для мезоструктуры цементно-песчаного раствора, кроме перечисленных факторов, опре-

деляющих микроструктуру цементного камня, важными управляемыми факторами являются состав раствора, гранулометрический и минералогический составы песка, форма его зерен, характер поверхности частиц и их загрязненность. Мезоструктуру цементно-песчаного раствора можно рассматривать как конгломератную структуру, в которой матрица – это цементный камень. Такая модель является наиболее общей для подобных двухкомпонентных систем, однако теория этих структур разработана еще недостаточно полно. Макроструктура бетона имеет много общего с мезоструктурой, поскольку в данном случае в качестве матрицы может быть рассмотрен цементно-песчаный раствор, в котором распределен крупный заполнитель. Для конгломератных мезо- и макроструктур кроме свойств матрицы и самого заполнителя (мелкого или крупного) большое значение имеет и распределение заполнителя в объеме бетона.

Предложено классифицировать новообразования по степени их дисперсности [8] на три группы:

- а) коллоидные;
- б) субмикрорекристаллические;
- в) макрорекристаллические.

Обоснованность подобной классификации новообразований полностью подтверждается данными о продуктах гидратации цемента. Ниже приведены сведения о степени дисперсности новообразований, образующихся при реакциях гидратации портландцемента нормального твердения. При этом в [8] новообразования подразделяются по степени их дисперсности на группы:

- коллоидные (менее 100 Å) – тоберморитовый гель;
- субмикрорекристаллические (100–1000 Å) – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и различные фазы, содержащие Al^{3+} , Fe^{3+} и SO_4^{2-} ;
- микрорекристаллические (более 1000 Å) – $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В [9] А. Е. Шейкиным для твердеющего цементного камня предлагаются три основные структурные составляющие:

1) кристаллический сросток, образованный сросшимися друг с другом кристаллами гидроалюминатов кальция, гидрата окиси кальция, а также гидросульфалюмината и гидросульфогидроферрита кальция;

2) тоберморитовый гель, в котором дисперсной фазой являются субмикрорекристаллы гидросиликатов кальция;

3) не до конца гидратированные зерна цемента.

Кристаллизационная структура (кристаллический сросток) цементного камня возникает в результате кристаллизации из жидкой фазы смешанных кристаллов и их последующего срастания друг с другом. При этом смешанные кристаллы образуются как путем замены в кристаллических решетках ионов одинаковой валентности (например, образование твердых растворов гидроалюминатов и гидроферритов кальция), т. е. путем изовалентного изоморфизма и в результате гетеровалентного изоморфизма, когда в кристаллической решетке происходит замена ионов разной валентности. Причем электростатический баланс восстанавливается изменением числа ионов в решетке, например по схеме $3\text{Ca}^{2+} - 2\text{Al}^{3+}$. Возможность взаимного замещения определяется не только свойствами ионов, типом соединения и геометрическим подобием структуры решетки, но и концентрацией ионов в жидкой фазе цементно-водной суспензии. При образовании кристаллического сростка цементного камня в кристаллические решетки отдельных новообразований включаются слои и блоки субмикрорекристаллов других новых фаз, возникающих в процессе гидратации цемента. Кристаллический сросток цементного камня образуется из микроскопических кристаллических сростков, которые или объединяются в единый каркас, или остаются в структуре цементного камня в виде микроскопических включений, разобщенных тоберморитовым гелем. В тоберморитовом геле дисперсной фазой являются субмикрорекристаллы гидросиликатов кальция, образующиеся при гидратации силикатных фаз портландцементного клинкера (трехкальциевого и двухкальциевого силикатов). Тоберморитовый гель – основной структурный компонент цементного камня, занимающий примерно 75 % его объема.

Происхождение пор в бетоне

Одна из важнейших характеристик структуры бетона – параметры его порового пространства. Это связано с тем, что цементный камень и соответственно раствор и бетон по

своей природе капиллярно-пористые материалы. Известно, что даже незначительное по объему количество пустот в материалах приводит к резкому изменению их свойств. Поэтому все важные для практики свойства бетона в той или иной степени связаны с объемом и характером структуры его порового пространства.

Рассматривая классификацию пор по их происхождению, следует отметить, что образование основного объема пор в бетоне связано с избыточным количеством воды, которое вводится в бетонную смесь для придания ей необходимой подвижности. Объем такой воды зависит от водоцементного отношения, степени гидратации цемента и других факторов. В пределах колебаний расхода воды от 160 до 240 л/м³ и цемента от 300 до 600 кг/м³ объем свободной воды в затвердевшем бетоне в среднем составляет 5–20 % от его объема. Эти поры образуют в цементном камне и бетоне систему сообщающихся капилляров, поэтому их называют капиллярными. Размер капиллярных пор колеблется от 0,1–1,0 до 20,0–50,0 мкм и более. В отличие от пор цементного геля, которые характеризуются непрерывностью, капиллярные поры могут иметь прерывистую структуру, что положительно влияет на снижение проницаемости бетона и повышение его долговечности. В зависимости от условий твердения бетона гелевые, контракционные и капиллярные поры могут быть заполнены либо водой, либо воздухом [10].

Образование в бетоне воздушных пор может быть вызвано несколькими причинами. В бетонной смеси всегда содержится некоторое количество воздуха, который был вначале адсорбирован на поверхности зерен цемента и заполнителей и при перемешивании не был удален вследствие неполного смачивания поверхности зерен либо введения специальных (воздухововлекающих) добавок. Эти воздушные поры обычно имеют сферическую форму и размеры от 25 до 500 мкм и более. Объем воздушных пор редко превышает 5 % от объема бетона. Кроме того, в бетонных смесях при их уплотнении возможно защемление дополнительного количества воздуха, распределенного в бетоне случайно, поэтому эти пустоты также снижают однородность материала и ухудшают его свойства. Таким образом, в результате различных деструктивных процессов возможны

разрушение структуры бетона и образование дополнительного порового пространства, которое обычно заполняется воздухом.

К дефектам структуры бетона относятся также седиментационные поры, образуемые в результате наружного и внутреннего водоотделения. При наружном водоотделении часть воды затвердения, обтекая крупный заполнитель, выходит наверх, образуя систему направленных сообщающихся капиллярных пор. Другая часть воды скапливается под крупным заполнителем, насыщая зоны контакта (внутреннее водоотделение). Седиментационные поры имеют размер 50–100 мкм. Установлено, что чем тоньше прослойка раствора вокруг крупного заполнителя, тем меньше наружное и тем больше внутреннее водоотделение в бетоне. По мнению многих исследователей, седиментационные полости являются основными путями проникания в бетон воды, так как в отличие от капилляров в седиментационных порах размером более 50 мкм вода находится в свободном состоянии и может перемещаться под действием силы тяжести или незначительного гидростатического давления. Поэтому седиментационные поры часто играют в бетоне решающую роль в процессах фильтрации и оказывают большое влияние на его долговечность.

В цементном камне имеются также контракционные поры, образующиеся вследствие проявления контракции системы «цемент – вода» при твердении цементного камня. Существует предположение, что контракционные поры имеют размеры, характерные для капиллярных, и являются их разновидностью. Для выяснения природы таких пор проведем следующий анализ.

Если принять объем цемента 1 см³, то при полной его гидратации объем новообразований составляет 2,2 см³. Плотность алитового портландцементного клинкера примерно 3,15 г/см³, т. е. масса 1,00 см³ цемента 3,15 г. Известно, что на химическое взаимодействие расходуется около 25 % воды от массы цемента. Расход воды на гидратацию составит $3,15 - 0,25 = 0,788$ г, а ее объем при плотности 1,000 г/см³ – 0,788 см³. Тогда объем твердой фазы цементного камня выразится суммой объемов цемента и связанной воды, т. е. $1,000 + 0,788 = 1,788$ см³. Разность общего объема новообра-

зований и объема твердой фазы цементного камня $2,2 - 1,788 = 0,412 \text{ см}^3$ – это объем свободной воды, не вступающей в химическое взаимодействие с цементом.

При пористости новообразований 28 % объем пор в них $2,2 \cdot 0,28 = 0,616 \text{ см}^3$, а объем твердой фазы $2,200 - 0,616 = 1,584 \text{ см}^3$. Поскольку объем пор в новообразованиях равен $0,616 \text{ см}^3$, а свободной воды $0,412 \text{ см}^3$, она размещается в порах новообразований, и еще остаются свободные поры, объем которых $0,616 - 0,412 = 0,204 \text{ см}^3$. По отношению к объему цементного камня это составит $0,204 : 2,2 = 0,093 \text{ см}^3$. Учитывая, что в 1 см^3 цементного камня объем цемента $1 : 2,2 = 0,455 \text{ см}^3$, а его масса $0,455 \cdot 3,150 = 1,435 \text{ г}$, контракция будет $0,093 : 1,435 = 0,065 \text{ см}^3$ на 1 г цемента, что подтверждено экспериментально.

Контракция зависит от содержания воды в цементном тесте: чем больше В/Ц, тем больше (при одном и том же расходе цемента) объем цементного теста и тем меньше контракция. При неполной гидратации контракция проявляется в меньшей степени. При введении минеральных добавок она также снижается пропорционально их содержанию. На основании изложенного можно видеть, что контрактационные поры – это поры в новообразованиях. Кроме указанных выше пор, возможно появление в бетоне и других дефектов в период его эксплуатации. К таким дефектам относятся усадочные, температурные и другие трещины, поры выщелачивания, дефекты, появляющиеся в результате коррозионного воздействия среды и т. д.

Завершая обзор классификации пор по происхождению, необходимо отметить, что, во-первых, параметры поровой структуры цементного камня и бетона постоянно изменяются во времени. Так, по мере гидратации капиллярные поры постепенно замещаются новообразованиями, что ведет к увеличению объема гелевых пор за счет снижения объема капиллярных. При этом снижается как общий суммарный объем порового пространства, так и средний размер пор. Во-вторых, в цементном камне идет и противоположный процесс – процесс «старения», который приводит к увеличению количества крупных капилляров цементного камня.

Форма, размеры и расположение пор в бетоне

По форме и взаимному расположению поры и капилляры цементного камня и бетона классифицируют на несколько групп [11–13]:

а) по форме поперечного сечения: ровные трубчатые, бутылкообразные, клиновидные, щелевые и их комбинации;

б) по протяженности: прямые, извилистые, петлеобразные;

в) по непрерывности: открытые (каналообразующие), тупиковые, условно закрытые.

Одной из важных является также классификация пор цементного камня и бетона по их эффективным радиусам. Хотя в настоящее время и нет общепринятой методики деления пор капиллярно-пористых тел по размерам, все же можно отметить, что наиболее полно этот вопрос разработан А. В. Лыковым [14] и М. М. Дубининым [15]. По их представлениям, капиллярными называются поры, для которых капиллярный потенциал значительно больше потенциала поля тяжести. В капиллярных порах поверхность жидкости принимает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения, и мало искажается за счет силы тяжести. Капиллярные поры делят на микро- и макрокапилляры. Основным критерий при этом делении – отношение пор к явлению капиллярной конденсации. В результате адсорбции паров воды из воздуха стенки капилляра покрываются слоем влаги толщиной около $0,1 \text{ мкм}$. Если радиус капилляра меньше этой величины, то такой капилляр может быть полностью заполнен жидкостью в результате сорбции ее паров независимо от того, есть ли у капилляра дно или он сквозной. При радиусе более $0,1 \text{ мкм}$ мениски не смыкаются и капиллярная конденсация может происходить только в несквозных капиллярах. Таким образом, микрокапилляры с радиусами, меньшими $0,1 \text{ мкм}$, могут заполняться за счет сорбции паров воды из окружающей среды и образования пленок на стенках. Макрокапилляры с радиусами, большими $0,1 \text{ мкм}$, могут быть заполнены жидкостью только при непосредственном контакте с ней. Кроме того, особенностью макрокапилляров является то, что они не только не сорбируют влагу из влажного воздуха, а наоборот, могут отдавать первоначально находившуюся в них влагу в атмосферу. Поэтому гигроскопичность бетонов и их равновесная влажность зависят в первую очередь от соотношения в них микро- и макрокапилляров.

Важная закономерность явления капиллярной конденсации состоит в том, что оно качественно не связано со смачиваемостью стенок

капилляра, т. е. гидрофобные микрокапилляры могут сорбировать влагу из воздуха, а гидрофильные макрокапилляры отдавать влагу в насыщенную водяными парами атмосферу. Давление насыщенного пара над вогнутой поверхностью жидкости в капилляре меньше, чем над плоской поверхностью. Для микрокапилляров с радиусами менее 0,1 мкм давление снижается весьма существенно, в то время как для макрокапилляров снижением давления можно пренебречь.

В [16] при изучении пор в адсорбентах была выявлена также группа пор размерами 15–20 Å. Такие поры обнаружены и в цементном камне. Увеличение потенциала адсорбции – причина объемного заполнения этих пор. Для цементного камня и бетона наиболее удобно делить поры на три группы: микрокапилляры ($r < 0,1$ мкм), макрокапилляры ($(1-10) > r > 0,1$ мкм) и некапиллярные поры. Иногда можно дополнительно дифференцировать микропоры на ультрамикропоры ($r < 50$ Å) и переходные микропоры ($50 \text{ Å} < r < 0,1$ мкм).

Методы определения пористости цементного камня и бетона

Наиболее распространенный метод определения общей пористости цементного камня и бетона – основанный на представлении, что объем пор выражается разностью общего объема материала и объема его твердой фазы:

$$P = 1 - \rho_{\text{ср}}/\rho,$$

где P – пористость материала; $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность материала; ρ – плотность твердой фазы материала [11].

Однако общая пористость не может характеризовать проницаемость цементного камня или бетона, поскольку перенос жидкости в цементном камне или бетоне осуществляется только в крупных порах. В настоящее время для определения характера распределения пор по размерам в цементном камне используется ряд методов: микроскопический, метод капиллярного подсоса, вытеснения воды воздухом, сорбционные методы, методы ртутной порометрии и радиоактивных изотопов. Каждый из этих методов не может дать полную картину дифференциальной пористости цементного камня или бетона. Так, методом микроскопии можно диагностировать пористость материала с размерами пор 2 мкм и более; капиллярного

подсоса – с размерами 0,1–20,0 мкм; вытеснения воды воздухом – при порах диаметрами от 1 мкм до 1 мм. Сорбционные методы, основанные на изучении характера изотерм адсорбции азота или циклогексана, позволяют выявлять поры размерами 0,0003–0,2000 мкм. Методом ртутной порометрии можно обнаружить поры диаметрами от 0,004 мкм до 1,000 мм, а с применением радиоактивных изотопов – 0,01 мкм и более [11].

Поскольку поры в цементном камне имеют размеры от нескольких десятков ангстрем до долей миллиметра, наиболее предпочтительными методами диагностирования пористости являются сорбционные и ртутной порометрии. Однако такие методы позволяют выявлять до 70 % объема пор цементного камня, а основанные на адсорбции циклогексана – до 50 %. Это обусловлено тем, что часть пор цементного камня недоступна для азота и циклогексана. Методом ртутной порометрии истинный характер пористости выявить невозможно вследствие использования высоких давлений (до 350 МПа) при проведении исследования, значительно превышающих пределы прочности цементного камня. Наилучшие результаты получаются при определении дифференциальной пористости одновременно несколькими методами. В этом случае осуществляется контроль точности измерений и повышается достоверность получаемых результатов.

Многочисленные исследования пористости цементного камня показывают, что на непрерывных кривых распределения пор по размерам четко просматриваются два максимума. Первый, ярко выраженный, соответствует размеру пор около 0,0045 мкм, второй – около 0,2000 мкм. В первом случае – это поры в новообразованиях цементного камня. Они формируются при физико-химическом взаимодействии цемента с водой и образовании гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроферритов кальция. Как установлено, объем этих пор составляет 28 % от общего объема новообразований. Максимум относится к капиллярным порам, образующимся вследствие присутствия в цементном камне свободной (несвязанной) воды, заземленного воздуха, оставшегося в системе при неполном поглощении воды твердой фазой, а также вовлеченного в процессе перемешивания и не вытесненного при уплотнении цементного теста. Для цементных рас-

творов и бетонов характерны также поры размерами 1–9 мкм (третий максимум на кривой распределения). Эти поры образуются вследствие неполного контакта цементного камня с поверхностью заполнителей. При этом в контактной зоне наблюдаются локальное повышение водоцементного отношения, увеличение объема гидратных новообразований, разрыхление искусственного камня. Поры в новообразованиях имеют размеры 0,0015–0,0030 мкм. В процессе изменения объема цементного камня такие поры, и особенно контракционные, могут укрупняться. Первый максимум на кривых распределения пор по размерам характеризует укрупнение пор в новообразованиях при разрежении газовой среды в порах формирующегося цементного камня. Исследования кинетики контракции твердеющего цементного теста показали полное совпадение с вышеприведенными расчетными характеристиками, отображающими фазовый состав цементного камня. Полученные данные позволяют представить выражение для расчетного определения контракционной пористости цементного камня, т. е. контракцию (см^3) можно выразить как

$$V_{\text{контр}} = 0,065(1 - D)\mu\Pi,$$

где Π – расход цемента (г) на 1 см^3 цементного теста; μ – степень гидратации цемента; D – содержание минеральных добавок в цементе.

Объем цементного камня (см^3) с учетом имеющего место контракционного изменения объема цементного теста к началу схватывания

$$V_{\text{т}} = \varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi),$$

где φ – коэффициент контракции цементного теста, зависящий от относительного водосодержания цементного теста; $\rho_{\text{ц}}$ – плотность цемента, г/см^3 .

Тогда контракционная пористость цементного камня

$$\Pi_{\text{контр}} = \frac{0,205(1 - D)\mu/\rho_{\text{ц}}}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)}.$$

Пористость новообразований, капиллярная и общая пористость цементного камня:

$$\Pi_{\text{н.о}} = \frac{0,616(1 - D)\mu/\rho_{\text{ц}}}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)};$$

$$\Pi_{\text{кап}} = 1 - \frac{1/\rho_{\text{ц}}[1 + 1,405\mu(1 - D)]}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)};$$

$$\Pi_{\text{общ}} = 1 - \frac{1/\rho_{\text{ц}}[1 + 0,789\mu(1 - D)]}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)}.$$

Полученные выражения можно использовать для расчетов структурной пористости цементного камня. Их отличительная особенность заключается в учете контракции твердеющего цементного теста, которая оказывает значительное влияние на объем формирующегося искусственного камня [11]. Структурная пористость бетона определяется пористостью цементного камня. Однако пористость бетона может отличаться от расчетной, поскольку в бетонной смеси возрастает вероятность образования седиментационных полостей в контактной зоне цементного камня с заполнителями и накопления воздушных пузырьков, вовлеченных при перемешивании смеси и при ее уплотнении.

Различные по размерам поры по-разному участвуют в процессах массопереноса. Поры в новообразованиях и контракционные вследствие чрезвычайно малых размеров прочно удерживают воду. Вода в них не содержит растворенных веществ, а фильтрующиеся через такое капиллярно-пористое тело растворы оставляют растворенные продукты в более крупных капиллярных порах. Поры в новообразованиях бетона, находящегося в обычной газовой среде естественной влажности, всегда заполнены водой. Капиллярные поры (0,2 мкм и более) вследствие малого различия давления насыщенного пара над мениском и плоской поверхностью не будут заполняться водой. Вода испаряется из открытых пор или перемещается в новообразования при дальнейшей гидратации цемента. Эти явления положены в основу разделения пор бетона на два различающихся по свойствам вида: микрокапилляры с размерами менее 0,2 мкм, макрокапилляры с размерами 0,2 мкм и более.

Влагоненос в цементном камне и бетоне

Наибольшую опасность для бетона и железобетона представляют жидкие агрессивные среды. Воздействие на бетон твердых и газообразных сред происходит в основном после рас-

творения их в воде и проникновения в капиллярно-пористое тело бетона. Проникновение в бетон жидких сред зависит от размера поровых каналов и обусловлено природой переноса жидкости в бетон. Возможны три разновидности механизма переноса жидкости: вязкостное течение, подчиняющееся закону Пуазейля; капиллярный поток, объясняемый законом Дарси; диффузионный перенос, подчиняющийся закону Фика.

Молекулярная диффузия наблюдается при максимальных радиусах поровых каналов менее 0,1 мкм, капиллярный поток – при 0,1–10,0 мкм, а вязкостное течение жидкостей при средних давлениях – при радиусе пор более 1,0 мкм. Поскольку перенос жидкости в теле цементного камня и бетона в основном предопределяется вязкостным течением и капиллярным переносом, можно считать, что основными путями движения воды являются капиллярные и седиментационные поры цементного камня и бетона.

Водопроницаемость бетона зависит от водоцементного отношения. Чем меньше В/Ц, тем плотнее бетон и меньше его водопроницаемость. При снижении В/Ц с 0,5 до 0,3 проницаемость его уменьшается в 50 раз. Однако более точно характеризует водопроницаемость бетона не общее значение В/Ц, а относительное водосодержание цементного теста $X = \frac{В/Ц_t}{K_{н.г}}$

($K_{н.г}$ – коэффициент нормальной густоты цементного теста).

Характеристикой водопроницаемости цементного камня и бетона является коэффициент фильтрации

$$k_{\phi} = \frac{Qh}{tAH},$$

где k_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/с; Q – средний расход воды на период фильтрации, м³; h – толщина слоя фильтрующего материала, м; t – продолжительность фильтрации, с; A – площадь фильтрующей поверхности, м²; H – напор воды на испытываемой поверхности (высота столба воды), м.

Результаты исследований показывают, что как в цементном камне, так и в бетоне значение коэффициента фильтрации увеличивается с повышением относительного водосодержания. Коэффициент фильтрации при изменении от-

носительного водосодержания от нижнего до верхнего пределов связности цементного теста увеличивается примерно в 50 раз. При этом изменение k_{ϕ} в зависимости от относительного водосодержания носит почти линейный характер. Установлена идентичность изменений коэффициента фильтрации и капиллярной пористости в зависимости от относительного водосодержания цементного теста. Это показывает, что водопроницаемость цементного камня обуславливается его капиллярной пористостью.

Проницаемость цементного камня и бетона зависит от продолжительности и условий их твердения. Сроки и условия твердения предопределяют степень гидратации цемента. При увеличении степени гидратации цемента на 1,0 % капиллярная пористость изменяется на 0,5 %. Следовательно, для получения цементного камня и бетона с наименьшей водопроницаемостью необходимо создавать условия для полной гидратации используемого вяжущего. Исследования показали, что наилучшие результаты получаются при твердении бетона в воде. Водопроницаемость его при этом снижается в два раза по сравнению с бетоном, твердевшим в нормально-влажностных условиях. Объясняется это в первую очередь тем, что при твердении в воде полнее проходит гидратация цемента. Тепловлажностная обработка бетона обуславливает повышение пористости цементного камня, и в результате проницаемость бетона возрастает в 3–4 раза.

Водопроницаемость бетона зависит и от свойств заполнителей. Система капилляров в зоне контакта цементного камня с заполнителями – основной путь проникновения в бетон воды. Здесь, прежде всего, и образуются очаги разрушения бетона при всех видах коррозии. Седиментация (расслоение) бетонной смеси сопровождается увеличением проницаемости бетона. В бетоне с малым объемом заполнителя внутреннее водоотделение меньше, а наружное больше. Седиментационное водоотделение в бетоне обусловлено явлением водоотделения в цементном тесте, которое проявляется вследствие расслоения твердой фазы цементного теста и контракции системы цемент – вода. Водоотделение возрастает с увеличением В/Ц.

Характер изменения водоотделения свидетельствует о том, что отслаивание воды происходит в результате седиментации цементных флюкулов и последующего проявления коагуля-

ционного структурообразования формирующегося скелета искусственного камня. Когда свободная вода находится лишь в структурных ячейках и полостях цементного теста, водоотделение проявляется очень слабо, поскольку седиментация ограничена тесным контактированием зерен цемента. Водоотделение в этом случае может происходить лишь за счет некоторого растворения поверхностных слоев зерен минералов портландцементного клинкера и контракции цементного теста.

При В/Ц более $1,65K_{н.г.}$, когда система цемент – вода представляет собой суспензию взвешенных в воде зерен цемента, свободно протекающий процесс седиментации способствует значительному водоотделению до остаточного В/Ц, равного примерно $1,65K_{н.г.}$. Относительный объем отслаивающейся воды (при В/Ц более $1,65K_{н.г.}$) $B = 26,5 \%$. Поскольку В/Ц теста, соответствующее верхнему пределу связности ($1,65K_{н.г.}$), составляет $0,45–0,50$, а масса воды, физически связываемой заполнителем, примерно $10–15 \%$ от массы цемента, заметное седиментационное водоотделение может иметь место при В/Ц бетона более $0,6$. При В/Ц до $0,6$, когда вся вода в бетоне удерживается заполнителями и цементным тестом, водоотделение незначительно и практически не сказывается на процессе фильтрации воды сквозь бетон.

При твердении бетона его газо- и водопроницаемость уменьшаются. Как показывают результаты исследований, в первые 15 сут. твердения водопроницаемость бетона снижается в два раза, в последующие 15 сут. – еще в два раза. Водопроницаемость бетона в двухмесячном возрасте составляет примерно 50% от соответствующего показателя одномесячного бетона, в трехмесячном – около 37% , в шестимесячном – около 25% , а в возрасте одного года – не более 20% . Снижение проницаемости бетона во времени происходит вследствие продолжающегося процесса твердения. Однако водопроницаемость зависит также и от других факторов.

Фильтрация воды через бетон характеризуется двумя последовательными этапами: первым – с неустановившимся, вторым – с установившимся режимами. Предполагалось, что заметное, а иногда даже резкое увеличение фильтрационного расхода в начале первого этапа обусловлено вытеснением всей свободной воды, занимающей крупные и мелкие

поры. Затем происходит не только вытеснение свободной воды, содержащей сравнительно мало растворенных веществ и продуктов гидролиза, но и перемещение под действием напорной фильтрации мелкодисперсных фракций цемента, которые образуются в процессе адсорбционной и химической пептизации на поверхности цементных частиц. Всякое значительное перемещение мельчайших частиц, отщепившихся при пептизации, неизбежно повлечет закупорку наиболее тонких капилляров и пор в цементном камне, вследствие чего они постепенно выключаются из общего фильтрующего порового пространства. Этот процесс при общем увеличении объема твердой фазы при гидратации, а также набухании цементного камня приводит к постепенному снижению фильтрационного расхода. Свободными для фильтрации остаются лишь сравнительно крупные поры и каналы, не поддающиеся закупорке частицами коллоидных размеров. Площадь фильтрации через эти сравнительно крупные поры и определяет тот постоянный расход воды, который окончательно устанавливается на втором этапе фильтрации. Продолжительность достижения установившегося режима, согласно данным многих исследователей, в зависимости от условий твердения бетона составляет $120–360$ ч.

В настоящее время считается, что самоуплотнение бетона происходит в результате постепенного сужения путей фильтрации жидкости и перехода части капилляров из системы сообщающихся в систему замкнутых пор. Основными причинами сужения капилляров являются: рост объема новообразований при гидролизе и гидратации цемента и набухание гелеобразной составляющей цементного камня; отложение в капиллярах нерастворимых карбонатов кальция, образующихся при реакции свободного гидроксида кальция и уголекислоты из фильтрующейся воды; закупорка капилляров высокодисперсными, взвешенными в воде частицами твердой фазы; закупорка капилляров газовыми пузырьками, выделяющимися из воды.

При снижении давления в процессе фильтрации газовые пузырьки расширяются и заполняют поры, препятствуя продвижению жидкости. При этом скорость фильтрации может снижаться в два и более раз. Это явление носит название эффекта Жамена. С повышени-

ем давления проницаемость бетона возрастает (закон Дарси). Находящийся в порах бетона воздух постепенно растворяется в жидкой фазе бетона, вследствие чего увеличиваются количество и сечение фильтрующих каналов.

Процесс самоуплотнения частично обратим. Например, при высушивании бетона его проницаемость возрастает, однако не достигает первоначального значения, поскольку карбонизация и закупорка капилляров высокодисперсными частицами твердой фазы обуславливают необратимое сужение капиллярных путей движения жидкости. Приведенные характеристики порового пространства бетонной автомобильной дороги являются основой для использования пропитки его верхнего слоя различными материалами.

ВЫВОДЫ

1. Приведены классификации структуры дорожного бетона, используемые как основа для последующей защиты его верхнего слоя.

2. Отмечена решающая роль поровой структуры бетона как основы для пропиточного уплотнения верхнего слоя с целью ликвидации пылеобразования, упрочнения и гидрофобизации поверхностного слоя дорожного бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мосты и трубы. Вторичная защита от коррозии бетонных и железобетонных конструкций. Правила проектирования и устройства: ТКП 576–2015 (33200). Минск: Мин-во транспорта и коммуникаций, 2015. 88 с.
2. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1980. 464 с.
3. Гордон, С. С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях / С. С. Гордон. М.: Стройиздат, 1969. 151 с.
4. Соломатов, В. И. Структурообразование и технология полимербетонов / В. И. Соломатов // Строительные материалы. 1970. № 2. С. 33–34.
5. Шестоперов, С. В. Технология бетона / С. В. Шестоперов. М.: Высш. шк., 1977. 432 с.
6. Баженов, Ю. М. Бетонополимеры / Ю. М. Баженов. М.: Стройиздат, 1983. 472 с.
7. Магдеев, У. Х. Слоистые защитно-декоративные композиты / У. Х. Магдеев. М.: Лиа-Пресс, 1977. 196 с.
8. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Стройиздат, 1987. 455 с.
9. Шейкин, А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А. Е. Шейкин. М.: Стройиздат, 1974. 191 с.
10. Чеховский, Ю. В. Понижение проницаемости бетона / Ю. М. Чеховский. М.: Энергия, 1968. 192 с.
11. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. Минск: Высш. шк., 1986. 200 с.

12. Соломатов, В. И. Структурообразование и технология полимербетонов / В. И. Соломатов // Строительные материалы. 1970. № 9. С. 33–34.
13. Соломатов, В. И. Технология полимербетонов и арм-полимербетонных изделий / В. И. Соломатов. М.: Стройиздат, 1984. 142 с.
14. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 471 с.
15. Дубинин, М. М. Исследование пористой структуры твердых тел сорбционными методами / М. М. Дубинин, Г. С. Жук, Е. Д. Заверина // Журнал физической химии. 1957. Т. 3, № 7. С. 32–35.

Поступила 15.04.2016

Подписана в печать 17.06.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. ТКП 576–2015 (33200). Bridges and Pipes. Secondary Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures Against Corrosion. Rules for Design and Installation. Minsk: Ministry of Transport and Communications, 2015. 88 (in Russian).
2. Akhverdov I. N. (1980) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat. 464 (in Russian).
3. Gordon S. S. (1969) *Structure and Properties of Heavy Concrete with Various Aggregates*. Moscow, Stroyizdat. 151 (in Russian).
4. Solomатов V. I. (1970) Structure Formation and Technology of Polymer Concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (2), 33–34 (in Russian).
5. Shestoperov S. V. (1977) *Concrete Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola. 432 (in Russian).
6. Bazhenov Yu. M. (1983) *Concrete Polymers*. Moscow, Stroyizdat. 472 (in Russian).
7. Magdeev U. Kh. (1977) *Layered Protective and Decorative Composites*. Moscow, Lia-Press. 196 (in Russian).
8. Bazhenov Yu. M. (1987) *Concrete Technology*. Moscow, Stroyizdat. 455 (in Russian).
9. Sheykin A. E. (1974) *Structure, Strength and Crack Resistance of Cement Stone*. Moscow, Stroyizdat. 191 (in Russian).
10. Tchekhovskiy Yu. V. (1968) *Reduction of Concrete Permeability*. Moscow, Energia. 192 (in Russian).
11. Shalimo M. A. (1986) *Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures against Corrosion*. Minsk, Vysshaya Shkola. 200 (in Russian).
12. Solomатов V. I. (1970) Structure Formation and Technology of Polymer Concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (9), 33–34 (in Russian).
13. Solomатов V. I. (1984) *Technology of Polymer Concrete and Reinforced Polymer Concrete Products*. Moscow, Stroyizdat. 142 (in Russian).
14. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energia. 471 (in Russian).
15. Dubinin M. M., Zhuk G. S., Zaverina E. D. (1957) Investigations on Porous Structure of Solid Bodies while Using Sorption Method. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii* [Journal of Physical Chemistry], 3 (7), 32–35 (in Russian).

Received: 15.04.2016

Accepted: 17.06.2016

Published online: 28.07.2016

Расчетная оценка анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь

Асп. Э. Я. Садин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Проанализированы преимущества и недостатки композитной арматуры при армировании железобетонных конструкций. Отражены результаты экспериментальных исследований прочности сцепления с бетоном стеклопластиковой арматуры производителей Республики Беларусь. Выполнен анализ влияния диаметра и длины контакта с бетоном стеклопластиковых арматурных стержней на прочность и деформативность сцепления с бетоном. Для изучения влияния диаметра и длины контакта с бетоном стеклопластиковых арматурных стержней на прочность и деформативность сцепления с бетоном композитной арматуры различных производителей изгибаемых железобетонных элементов контролировали характер разрушения опытных образцов и максимальную нагрузку, при которых сцепление стеклопластиковой арматуры с бетоном не нарушалось. Также контролировали перемещения незагруженного (свободного) и загруженного концов арматурного стержня относительно наружных граней бетона на обоих концах образца. Эксперименты показали, что разрушение опытных образцов происходило в результате возникновения одного из трех случаев: проскальзывания арматуры относительно бетона, скалывания защитного слоя бетона и разрыва композитной арматуры. Определены моменты начала сдвига арматурных стержней относительно бетона двумя разными методами. Представлены предложения по расчетной оценке анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры производства ООО «Стройкомпозит» (г. Гомель, Республика Беларусь), ООО «Научно-производственная компания «БизнесКонтинент» (г. Брест, Республика Беларусь) и ЧП «Минпласт» (г. Минск, Республика Беларусь).

Ключевые слова: анкеровка, стеклопластиковая арматура, железобетонные конструкции

Для цитирования: Садин, Э. Я. Расчетная оценка анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь / Э. Я. Садин // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 308–314

Calculation Assessment of Anchorage in Concrete for Fiberglass Reinforcement Manufactured in the Republic of Belarus

E. Ya. Sadin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper analyzes advantages and disadvantages of composite reinforcement while reinforcing concrete structures. Results of experimental investigations on adhesion strength of fiberglass reinforcement manufactured in the Republic of Belarus with concrete have been given in the paper. The paper contains an analysis pertaining to the influence of concrete contact diameter and length of fiberglass reinforcing bars on strength and deformability of adhesion with concrete. Failure behavior of prototypes and maximum loading that does cause breakage in adhesion of fiberglass reinforcement with the concrete have been controlled in order to study the influence of diameter and length of fiberglass reinforcing bar contact with the concrete on strength and deformability of concrete adhesion for composite reinforcement produced by various manufacturers. Displacement of non-loaded (free) and loaded ends of the reinforcing bars with regard to concrete exposed face on both specimen ends has been also controlled. The experiments have shown that destruction of the prototypes occurred due to initiation of one of the following three reasons: reinforcement sliding in reference to concrete, cleaving of a protective concrete layer or breakage of composite reinforcement. Start-up moments for reinforcing bar slip in relation to the concrete have been determined with the help of two methods. The paper provides proposals for calculation assessment of anchorage in the concrete

Адрес для переписки

Садин Эбраим Ягуб
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-97
ebrahim_sadin@yahoo.com

Address for correspondence

Sadin Ebrahim Yagoub
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-97
ebrahim_sadin@yahoo.com

for fiberglass reinforcement manufactured by the following enterprises and companies “Stroykompozit” (Gomel, Republic of Belarus), Research and Production Company (RPC) “Biznes-Kontinent” (Brest, Republic of Belarus) and Private Enterprise (PE) “Minplast” (Minsk, Republic of Belarus).

Keywords: anchorage, fiberglass reinforcement, reinforcement concrete structures

For citation: Sadin E. Ya. (2016) Calculation Assessment of Anchorage in Concrete for Fiberglass Reinforcement Manufactured in the Republic of Belarus. *Science & Technique*. 15 (4), 308–314 (in Russian)

Существующие сегодня потребности в экономии материальных ресурсов ставят задачу поиска и применения в строительстве новых конструктивных решений. Одним из таких решений, позволяющих экономить стальную арматуру, является использование в качестве армирования композитной арматуры в предварительно напряженных изгибаемых несущих композитобетонных конструкциях. К недостаткам или особенностям композитной арматуры, которые не позволяют повсеместно выполнить прямую замену металлической арматуры на композитную, относятся следующие ее свойства: низкий модуль упругости; более низкая огнестойкость изделий, армированных композитной арматурой; малая прочность при поперечных нагрузках; сложность изготовления гнутых арматурных изделий; сложность при изготовлении предварительно напряженных конструкций; отсутствие необходимых экспериментальных данных, в том числе о прочности сцепления композитной арматуры с бетоном [1–5].

Производимая в Беларуси и импортируемая в нашу республику композитная арматура имеет большой разброс в физико-механических и геометрических характеристиках, исходных материалах (сырье). Ввиду отсутствия нормативных документов, регламентирующих требования к композитной арматуре, имеются различия как в технологии изготовления арматуры, так и в геометрических параметрах образующегося при производстве периодического профиля. Выпускается арматура с песчаной посыпкой поверхности и без нее. Периодический профиль композитной арматуры производится при ее изготовлении путем спиральной обвивки сырой заготовки стержня крученой нитью из стеклянного волокна, пропитанной связующим. При обмотке нить натянута с определенным усилием, благодаря чему она вдавливаются в тело стержня. За счет этого арматура получает дополнительное уплотнение и периодический профиль. При этом очевиден тот факт, что, обладая различными параметрами периодического профи-

ля, композитная арматура различных производителей будет иметь и разные характеристики сцепления с бетоном [2, 3, 6].

С целью разработки предложений по расчету анкеровки в бетоне композитной стержневой арматуры производителей Республики Беларусь были выполнены исследования влияния диаметра и длины заделки арматурных стержней на прочность и деформативность сцепления с бетоном композитной арматуры различных производителей в изгибаемых элементах. Исследования выполняли для композитной арматуры трех производителей Республики Беларусь – ЧП «Минпласт» (г. Минск), ООО «Строй-композит» (г. Гомель), ООО «Научно-производственная компания «Бизнес-Континент» (г. Брест). Производили сравнительные испытания балок на свободных опорах, армированных стержнями стеклопластиковой арматуры (диаметрами 4–10 мм) указанных производителей с различными длинами контакта арматуры с бетоном (10d, 20d, 30d).

Поперечное сечение опытных образцов принимали прямоугольным с размерами сторон $b \times h = 150 \times 300$ мм. Длина образцов $L = 1500$ мм. Опытная балка в середине разделена на две части. Высоту сжатой зоны бетона фиксировали путем установки стальных уголков в пределах высоты $x_{eff} = 80$ мм с шарниром между ними (рис. 1). При этом в одной части заделки ($l_{задан}$) композитная арматура находилась в контакте с бетоном, а в другой (150 мм и 300 – $l_{задан}$) сцепление искусственно исключалось (стержень помещался в изолирующую трубку).

Опытные образцы-балки изготавливали с формированием в горизонтальном положении (для арматуры). Проектируемый класс бетона $C^{30}_{/37}$. Испытания проводили на гидравлическом прессе с расстоянием между двумя точками приложения нагрузки на балку 500 мм, расположенными симметрично относительно центра пролета. Расстояние от опоры до места приложения нагрузки принято 450 мм.

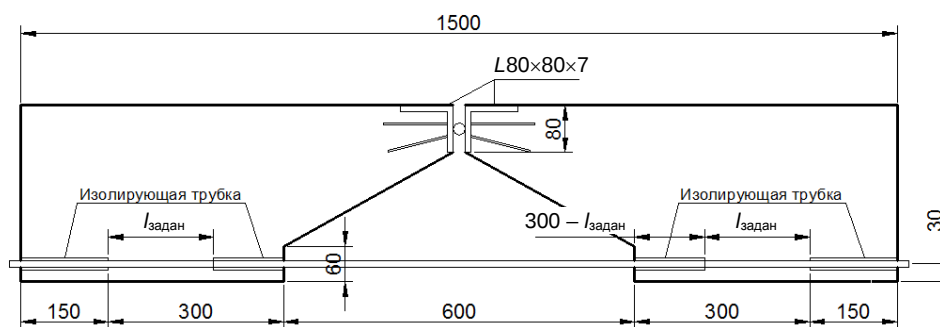


Рис. 1. Геометрические характеристики опытных балок

Fig. 1. Geometrical characteristics of prototyping beam

Для изучения влияния диаметра и длины контакта с бетоном стеклопластиковых арматурных стержней на прочность и деформативность сцепления с бетоном композитной арматуры различных производителей изгибаемых железобетонных элементов контролировали характер разрушения опытных образцов и максимальную нагрузку, при которых сцепление стеклопластиковой арматуры с бетоном не нарушалось ($p_{\max}$), а также перемещения незагруженного (свободного) (y_1) и загруженного (y_0) концов арматурного стержня относительно наружных граней бетона на обоих концах образца. Разрушение опытных образцов происходило в результате возникновения одного из трех случаев: проскальзывания арматуры относительно бетона, скалывания защитного слоя бетона или разрыва композитной арматуры (рис. 2).



Рис. 2. Опытный образец после разрушения в результате разрыва арматуры

Fig. 2. Prototyping specimen after destruction due to reinforcement breakage

Предельная нагрузка перед разрушением образцов зависела от величины заделки арматуры в бетон и диаметра стеклопластиковой арматуры. Разрушение балок, сопровождающе-

еся проскальзыванием стеклопластиковой арматуры относительно бетона, происходило практически во всех образцах с длиной заделки арматурных стержней в бетон, равной $10d$ и $20d$. При этом полное нарушение сцепления арматуры с бетоном наблюдалось на одном из концов испытуемого образца (рис. 3). Четыре опытных образца с длиной заделки арматуры в бетон, равной $30d$, разрушались по причине разрыва стеклопластиковой арматуры. На представленных графиках рис. 3, 4 маркер в виде квадратика обозначает разрушение образца по причине нарушения анкеровки арматуры в бетоне вследствие ее проскальзывания, маркер в виде кружочка – что образец разрушился по причине разрыва стеклопластиковой арматуры, маркер в виде треугольника показывает на графике образцы, в которых разрушению предшествовал скол защитного слоя бетона арматуры. Наиболее низкую прочность сцепления арматуры с бетоном показали образцы с арматурой производства ЧП «Минпласт», в которых разрушение балок со всеми длинами контакта стержней с бетоном сопровождалось проскальзыванием арматуры относительно бетона.

Сравнительный сводный график зависимости предельных перемещений незагруженного конца арматуры от длины контакта стержней с бетоном для арматуры различных производителей и разных диаметров показан на рис. 4.

В результате эксперимента выявлено, что арматура производства ООО «Бизнес-Континент» и ООО «Стройкомпозит» обладает большей деформативностью сцепления с бетоном, чем арматура производства ЧП «Минпласт», что, вероятно, связано с различным механизмом взаимодействия с бетоном стержней арматуры этих производителей.

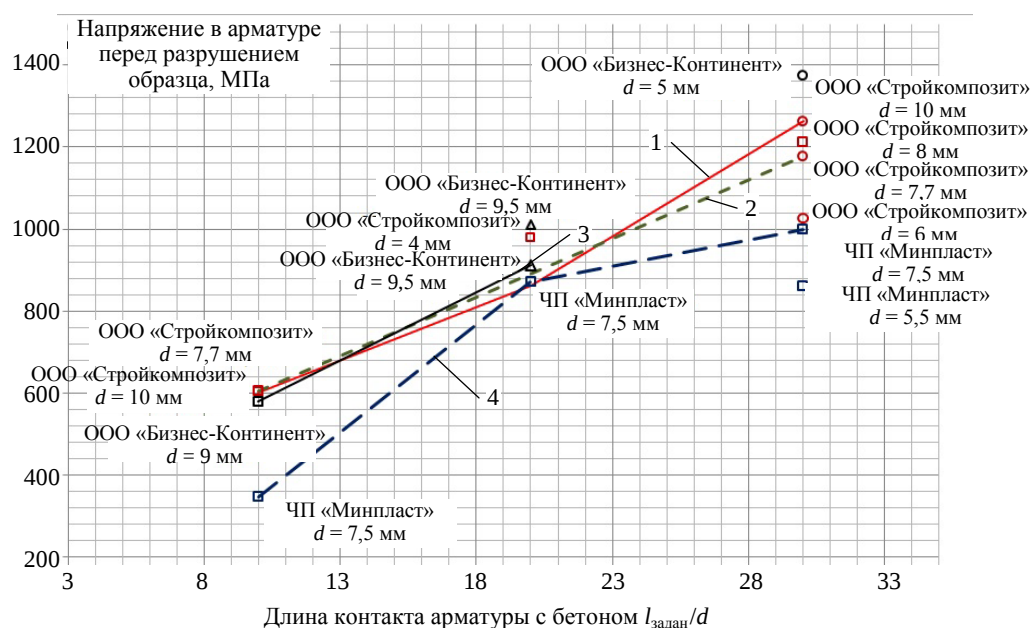


Рис. 3. График зависимости предельных напряжений в арматуре в момент разрушения образцов от длины контакта арматуры с бетоном: 1 – ООО «Стройкомпозит», $d = 10$ мм; 2 – ООО «Стройкомпозит», $d = 7,7$ мм; 3 – ООО «Бизнес-Континент», $d = 9,5$ мм; 4 – ЧП «Минпласт», $d = 7,5$ мм

Fig. 3. Dependence diagram of limiting stresses in reinforcement at the moment of specimen destruction on contact length of the reinforcement with concrete: 1 – LLC “Stroykompozit”, $d = 10$ mm; 2 – LLC “Stroykompozit”, $d = 7.7$ mm; 3 – LLC “Biznes-Kontinent”, $d = 9.5$ mm; 4 – PE “Minplast”, $d = 7.5$ mm

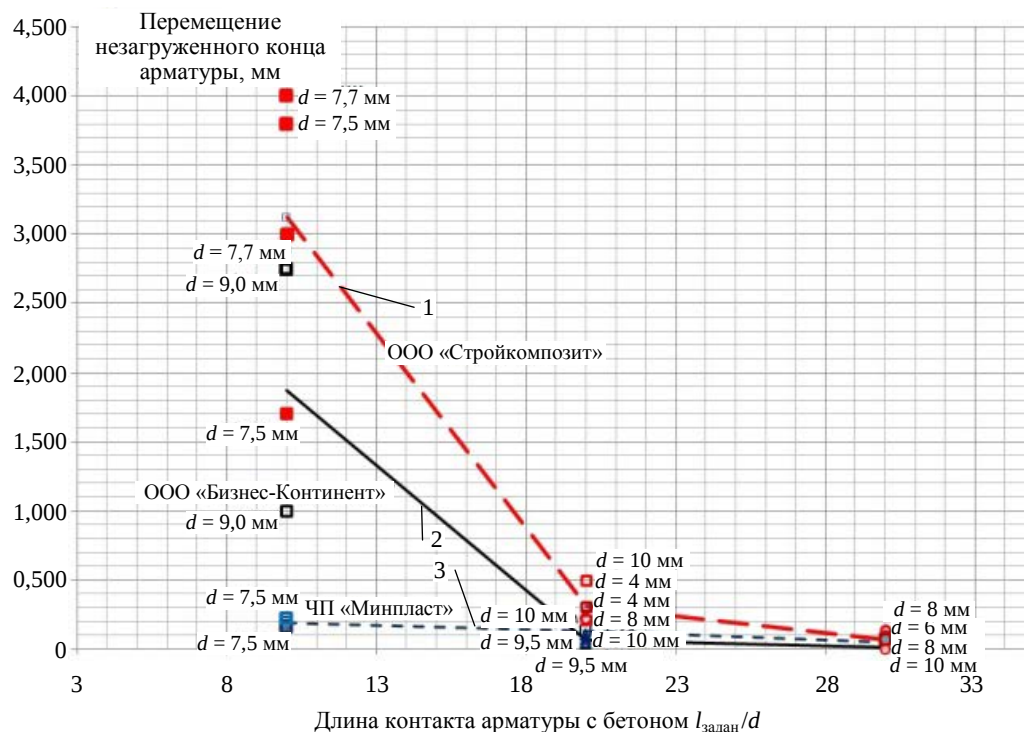


Рис. 4. График зависимости предельных перемещений незагруженного конца арматуры от длины контакта стержней с бетоном: 1 – ООО «Стройкомпозит»; 2 – ООО «Бизнес-Континент»; 3 – ЧП «Минпласт»

Fig. 4. Dependence diagram of limiting displacements of non-loaded reinforcement end on contact length of bar with concrete: 1 – LLC “Stroykompozit”; 2 – LLC “Biznes-Kontinent”; 3 – PE “Minplast”

Длина анкеровки арматуры в бетоне должна быть такой, чтобы при длительном действии нагрузки не происходило дальнейшего смещения незагруженного конца арматуры. Поэтому важным критерием сцепления является величина напряжений в арматуре при начале сдвига всего стержня. Измеряемые в процессе испытаний перемещения незагруженного конца стержня не вполне четко характеризуют этот момент, так как включают в себя, помимо собственно сдвига арматуры, также и перемещения бетона, полученные в результате деформации торца образца, деформаций смятия под выступами периодического профиля. Существует несколько подходов к определению момента начала сдвига арматуры относительно бетона. Один из подходов предполагает за критерий такой нагрузки принимать усилия, соответствующие перемещению незагруженного конца арматуры на величину 0,2 мм [7–9]. Кроме того, ряд исследователей предлагают для определения момента начала сдвига стержня включить в рассмотрение приращения перемещений незагруженного конца арматуры за одну ступень нагрузки. По характеру изменения данной величины определяется тот этап, который соответствует резкому непропорциональному увеличению приращения перемещений и принимается за момент начала сдвига [8, 9]. В проведенных исследованиях использовались обе вышеперечисленные методики.

В результате анализа опытных данных установлено отсутствие факта сдвига арматурного стержня вплоть до момента разрушения (достижения максимальных напряжений в стержнях) во всех образцах с длиной заделки в бетон $30d$. Сдвиг арматурного стержня не происходил до момента разрушения балок также и в образцах с длиной заделки $20d$ с арматурой производства ЧП «Минпласт» и ООО «Бизнес-Континент». Момент начала сдвига арматурного стержня относительно бетона во всех образцах с длиной заделки $10d$ наступал ранее момента разрушения образцов. Причем усилие, соответствующее моменту начала сдвига арматуры относительно бетона, составляло 0,66–0,70 от усилия, соответствующего наблюдаемым в опытах максимальным напряжениям в арматуре производства ООО «Строй-

композит», $\approx 0,76$ от усилия, соответствующего максимальным напряжениям в арматуре производства ООО «Бизнес-Континент», и $\approx 0,85$ от усилия, соответствующего максимальным напряжениям в арматуре производства ЧП «Минпласт». Следует отметить, что момент начала сдвига арматуры относительно бетона, установленный исходя из критерия перемещения незагруженного конца арматуры на величину 0,2 мм, оказался определяющим, так как момент, соответствующий резкому непропорциональному увеличению приращения перемещений незагруженного конца стержня, наступал несколько позже для всех образцов.

Длину анкеровки стеклопластиковой арматуры в бетоне предлагается определять по методике СНБ 5.03.01–02 [10], предварительно вычислив требуемые значения коэффициента η_3 для стеклопластиковой арматуры в формуле для расчета среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном. Для этого, используя полученные опытные величины максимальных напряжений на загруженном конце арматуры, для всех образцов можно определить требуемые значения коэффициента η_3

$$\eta_3 = \frac{\sigma_{S, \max} d}{4\eta_1 \eta_2 f_{ctd} l_{\text{задан}}},$$

где $\sigma_{S, \max}$ – максимальное напряжение в арматуре; f_{ctd} – расчетное сопротивление бетона растяжению (при $\gamma_c = 1,5$); η_1 – коэффициент, учитывающий влияние условий сцепления и положение стержней при бетонировании; η_2 – то же, учитывающий влияние диаметра арматуры (при $d \leq 32$ мм $\eta_2 = 1,0$; при $d > 32$ мм $\eta_2 = (132 - d)/100$); η_3 – то же, учитывающий форму профиля арматуры; $f_{\text{задан}}$ – длина анкеровки стержня в бетоне; d – диаметр арматурного стержня.

В целях обеспечения заделки арматурных стержней в бетоне с надлежащей безопасностью рекомендуется принимать наибольшее значение относительной длины анкеровки из полученных по предлагаемым рекомендациям. Поэтому следует определять длину анкеровки арматурных стержней с использованием в

расчетах коэффициента η_3 , вычисляемого по опытным данным, соответствующим перемещениям незагруженного конца арматуры на 0,2 мм (рис. 5).

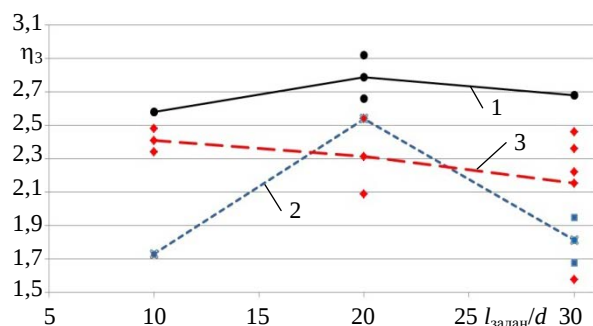


Рис. 5. Опытные значения коэффициента η_3 для образцов со стеклопластиковой арматурой, соответствующие перемещениям незагруженного конца арматуры на 0,2 мм: 1 – ООО «Бизнес-Континент»; 2 – ЧП «Минпласт»; 3 – ООО «Стройкомпозит»

Fig. 5. Experimental values of coefficient η_3 for specimens with fiberglass reinforcement that correspond to displacements for 0.2 mm: 1 – LLC “Biznes-Kontinent”; 2 – PE “Minplast”; 3 – LLC “Stroykompozit”

Средние значения коэффициента η_3 , определенные по опытным данным, соответствующим перемещениям незагруженного конца арматуры на 0,2 мм, составили: 2,23 – для арматуры производства ООО «Стройкомпозит»; 2,71 – для арматуры производства ООО «Бизнес-Континент»; 1,98 – для арматуры производства ЧП «Минпласт».

Рекомендуемые значения коэффициента η_3 для определения расчетного значения длины анкеровки следует принимать с учетом статистического анализа с доверительной вероятностью 0,95:

$\eta_3 = 1,99$ – для арматуры производства ООО «Стройкомпозит»;

$\eta_3 = 2,56$ – для арматуры производства ООО «Бизнес-Континент»;

$\eta_3 = 1,59$ – для арматуры производства ЧП «Минпласт».

ВЫВОДЫ

1. В ходе экспериментальных исследований установлены зависимости прочности сцепления с бетоном стеклопластиковой арматуры произ-

водителей Республики Беларусь от величины заделки арматуры в бетон. Разрушение опытных образцов происходило в результате возникновения одного из трех случаев: проскальзывания арматуры относительно бетона, скалывания защитного слоя бетона или разрыва композитной арматуры. Наиболее низкие показатели прочности сцепления арматуры с бетоном были у образцов с арматурой производства ЧП «Минпласт», в которых разрушение балок со всеми длинами контакта стержней с бетоном сопровождалось проскальзыванием арматуры относительно бетона.

2. При испытаниях выявлено, что арматура производства ООО «Бизнес-Континент» и ООО «Стройкомпозит» обладает большей деформативностью сцепления с бетоном, чем арматура производства ЧП «Минпласт», что, вероятно, связано с различным механизмом взаимодействия с бетоном стержней арматуры этих производителей.

3. Предложенные значения коэффициента η_3 , используемого в формуле для определения среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном, позволяют оценить расчетную длину анкеровки стеклопластиковой арматуры в бетоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н. П. Фролов. М.: Стройиздат, 1980. 104 с.
2. Лешкевич, О. Н. Перспективы применения композитной арматуры / О. Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Междунар. симп. (Минск, 9–11 нояб. 2011 г.): в 2 т. Минск: Минсктипроект, 2011. Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 233–238.
3. Хотько, А. А. Опыт и проблемы эффективного применения стеклопластиковой арматуры при армировании стеклопластбетонных конструкций / А. А. Хотько // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: сб. науч.-техн. статей. Минск: БНТУ, 2012. Ч. 1. С. 140–147.
4. Николаев, Е. Применение композитных материалов в строительстве в мире. Потенциал роста в России [Электронный ресурс] / Е. Николаев. 2011. Режим доступа: https://www.rusnanonet.ru/download/presentation/galen_in_the_world.pdf. Дата доступа: 30.03.2016
5. Степанова, В. Ф. Опыт применения неметаллической арматуры в конструкциях мостов на автомобильных доро-

- гах [Электронный ресурс] / В. Ф. Степанова // СТРОН-ГРУП. 2013. Режим доступа: <http://strongroup.pulscen.ru/articles/81758>. – Дата доступа: 30.05.2016.
6. Тур, В. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием стеклопластиковыми и стальными стержнями / В. В. Тур, В. В. Малева // Ресурсоэкономні матеріалі, конструкції, будовлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне, 2012. Вип. 24. С. 271–281.
 7. Мулин, Н. М. Стержневая арматура железобетонных конструкций / Н. М. Мулин. М.: Стройиздат, 1974. 232 с.
 8. Астрова, Т. И. Анкеровка стержней арматуры периодического профиля в обычном и предварительно напряженном железобетоне / Т. И. Астрова, С. А. Дмитриев, Н. М. Мулин // Расчет железобетонных конструкций: сб. тр. М.: НИИЖБ, 1961. С. 74–126.
 9. Терин, В. Д. Сцепление с бетоном ненапрягаемой арматуры различных видов профилей / В. Д. Терин, А. А. Хотко // Совершенствование железобетонных конструкций, оценка их состояния и усиление: сб. материалов Республ. науч.-техн. конф. Минск: Технопринт, 2001. С. 188–195.
 10. Строительные нормы Республики Беларусь. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01–02: введ. 01.07.03. Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2003. 139 с.

Поступила 19.04.2016

Подписана в печать 20.06.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Frolov N. P. (1980) *Fiberglass Reinforcement and Fiberglass Concrete Structures*. Moscow, Stroyizdat. 104 (in Russian).
2. Leshkevich O. N. (2011) Prospects for Application of Composite Reinforcement. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Materialy III Mezhdunar. Simp. T. 1: Betonnye i Zhelezobetonnye Konstruktsii* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Proceedings of the 3rd International Symposium. Vol. 1: Concrete and Reinforced Concrete Structures]. Minsk, Minsktipproekt, 233–238 (in Russian).
3. Khotko A. A. (2012) Experience and Problems in Efficient Application of Fiberglass Reinforcement while Reinforcing Fiberglass Concrete Structures. *Voprosy Vnedreniia Norm Proektirovaniia i Standartov Evropeiskogo Soiuzu v Oblasti Stroitelstva: Sb. Nauch.-Tekhn. Statei*

- [Problems on Introduction of Design Standards and European Union Standards in the Field of Construction: Collection of Scientific and Technical Papers]. Minsk: BNTU, 140–147 (in Russian).
4. Nikolayev E. (2011) *World-Wide Application of Composite Materials in Construction. Growth Potential in Russia*. Available at: https://www.rusnanonet.ru/download/presentation/galen_in_the_world.pdf. (accessed 30 March 2016) (in Russian).
 5. Stepanova V. F. (2013) Experience in Application of Non-Metallic Reinforcement in Structures of Bridges Constructed on the Highways. *STRONGROUP*. Available at: <http://strongroup.pulscen.ru/articles/81758>. (accessed 30 May 2016) (in Russian).
 6. Tur V. V., Malykha V. V. (2012) Resistance of Bending Reinforced Concrete Elements with Combined Reinforcement using Fiberglass and Steel Bars. *Resursoekonomni Materiali, Konstruktsii, Budovli ta Sporudi: Zb. Nauk. Prats* [Resource-Saving Materials, Structures, Construction and Buildings: Collection of Scientific Papers]. Rovno, Issue 24, 271–281 (in Russian).
 7. Mulin N. M. (1974) *Bar Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*. Moscow, Stroyizdat. 232 (in Russian).
 8. Astrova T. I., Dmitriev S. A., Mulin N. M. (1961) Anchorage of Deformed Bar Reinforcement in Normal and Preliminary Reinforced Concrete. *Raschet Zhelezobetonnykh Konstruktsii: Sb. Tr.* [Calculation of Reinforced Concrete Structures: Collection of Papers]. Moscow: NIIZhB [Scientific Research Institute of Reinforced Concrete], 74–126 (in Russian).
 9. Terin V. D., Khotko A. A. (2001) Adhesion Between Concrete and Non-Tensioned Reinforcement of Various Profiles. *Sovershenstvovanie Zhelezobetonnykh Konstruktsii, Otsenka ikh Sostoianiia i Usilenie: Sbornik Materialov Respublikanskoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Improvement of Reinforced Concrete Structures, Evaluation of their State and Strengthening: Collection of Materials of the Republican Scientific and Technical Conference]. Minsk, Tekhnoprint, 188–195 (in Russian).
 10. SNB 5.03.01–02. Construction Norms of Belarus. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Minsk: Minstroyarkhitektura, 2003. 139 (in Russian).

Received: 19.04.2016

Accepted: 20.06.2016

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-315–321

УДК 728.52

Современные курортные гостиницы Сирии: характер архитектуры и возможности для инновационной деятельности

Магистр Даниаль Юсеф¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В статье исследуется вопрос оценки условий и возможностей для инновационной деятельности в архитектурных решениях гостиниц Сирии. Проведен анализ понятия «инновация» применительно к архитектурной деятельности. До настоящего времени для градостроительных, климатических и социально-экономических условий Сирии нет однозначного толкования эффекта от инновационной деятельности не только применительно к архитектуре гостиниц, но и к архитектуре в целом. Факторы, определяющие инновационное развитие, – это, прежде всего, природные, производственные, научно-технические, технологические и другие ресурсы. Побудителем качественного развития архитектуры гостиниц в курортных зонах Сирии можно считать попытку уйти от устаревших проектных решений, потребность в развитии и росте экономического и социального уровня жизни, который до начала военных действий в стране достигался зачастую благодаря высокой туристической активности. Природно-климатический и исторический потенциал Сирии располагает к увеличению туристического потока и количественного состава гостиниц. Поэтому на данном этапе автор преследует цель выявить возможности для качественного развития новой архитектуры курортных гостиниц как наиболее востребованных среди туристов в Сирии. Несомненно, архитектура гостиниц должна не только отражать традиции и культуру региона, но и быть технически современной, чтобы удовлетворять мировому принципу устойчивого развития.

Ключевые слова: гостиница, традиции, инновационная деятельность, экологическая архитектура, фасады

Для цитирования: Юсеф, Даниаль. Современные курортные гостиницы Сирии: характер архитектуры и возможности для инновационной деятельности / Юсеф Даниаль // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 315–321

Modern Resort Hotels in Syria: Architecture Features and Possibilities for Innovation

Danial Yousef

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper explores conditions and possibilities for innovation activity in the field of architecture of Syrian hotels. A concept of “innovation” applied to architectural activity has been analyzed in the paper. Hitherto there is no unequivocal interpretation of effects due to innovation activity not only in respect of hotel architecture but also in respect of architecture as a whole and it concerns urban planning, climatic and socio-economic conditions of Syria. Factors determining innovative development represent natural, industrial, scientific and technical, technological and other resources. An effort to avoid out-of-date design solutions, requirements in development and growth of economic and social living standards can be considered as a driving force for qualitative development of hotel architecture in the resort areas of Syria. Prior to outbreak hostilities in the country the economic and social living standards have been achieved commonly due to high tourist activity. Natural-climatic and historical potential of Syria contribute to an increase of tourist flows and quantitative composition of hotels. So the purpose of the paper is to reveal the possibilities for qualitative development of new architecture in respect of resort hotels, as the most required hotels by tourists in Syria. It is an obvious fact that architecture of hotels should not only reflect traditions and culture of the region, but it must be also technically modern in order to satisfy a global principle of sustainable development.

Keywords: hotel, traditions, innovation activity, ecological architecture, facades

For citation: Yuosef Danial (2016) Modern Resort Hotels in Syria: Architecture Features and Conditions for Innovation. *Science & Technique*. 15 (4), 315–321 (in Russian)

Адрес для переписки

Юсеф Даниаль
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-07-06
arch.daniel.yousef@gmail.com

Address for correspondence

Yousef Danial
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-07-06
arch.daniel.yousef@gmail.com

Стремительное развитие строительных технологий, побуждаемое необходимостью экономить и оказывать должное внимание сохранности окружающей среды, способствует появлению инновационных технологий в современной архитектуре. А рост мирового туризма предъявляет повышенные требования не только к качеству гостиничного сервиса, но и к оригинальности и запоминаемости архитектурного облика зданий самих гостиниц. Выполнение таких требований напрямую зависит от эффективности инновационных процессов.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что на практике термин «инновация» все чаще используется применительно не только к новой технике, но и к любым другим сферам человеческой деятельности (управлению, образованию, медицине, военному делу и др.) [1]. В сфере архитектуры терминологическая трактовка понятия «инновация» было предложено Н. Я. Крижановской [2]: «...это итоговый результат создания (проект) и освоения (внедрения) принципиально нового или модифицированного объекта, удовлетворяющего конкретные потребности человека». Для нынешних условий Сирии инновационная деятельность в целом характеризуется значительным научно-техническим потенциалом и низким результирующим показателем инновационной активности.

Цель научной работы – выявление возможностей для инновационной деятельности в архитектуре современных курортных гостиниц, которые, как Бурдж-эль-Араб в ОАЭ, могут сформировать положительный имидж и стать визитной карточкой страны, что важно для сирийской экономики. К исследуемым гостиницам относятся такие, как «Афамия Ротана» (Afamia Rotana) в г. Латакия, «Порто Тартус» (Porto Tartous) в г. Тартус, «Маунтин Бриз» (Mountain Breeze) в горной местности округа Латакия. Все перечисленные гостиницы, высшей категории звездности, выбраны как наиболее посещаемые и привлекательные для туристов согласно статистике Министерства туризма Сирии [3].

Основной задачей при выявлении возможностей инновационной деятельности в сфере архитектуры гостиниц в Сирии является формирование более комфортной и органичной среды жизнедеятельности местного населения

и туристов. Особенности создания инновационных гостиничных объектов заключаются в новизне и эффективности их решения, современных экономических и социальных подходах. В последние несколько десятков лет развитие мировой архитектуры подвержено всеобщей концепции устойчивого развития, включающего в себя множество составляющих – социальную, экономическую, экологическую. Гостиницы, стремящиеся идти в ногу со временем, постепенно внедряют в свой облик элементы «зеленой» архитектуры – эксплуатируемые кровли, озелененные фасады, слияние здания с природным окружением. Несомненно, внедрение «зеленых» технологий – дело затратное, и в сирийских реалиях весьма нескорое для реализации, но актуальность такого рода внедрения обоснована множеством преимуществ для страны. Это и экономия внутренних и внешних ресурсов, и лояльность со стороны гостей из западных стран, где слова «устойчивый» и «зеленый» уже давно вошли в лексикон.

При проектировании гостиниц, как отмечает И. Л. Фоминых [4], основной задачей является создание наиболее благоприятной среды пребывания человека, отвечающей его функциональным, физиологическим и эстетическим потребностям. Здания должны соответствовать техническим и экономическим требованиям, быть прочными, долговечными, экономичными при строительстве и эксплуатации. Кроме того, они должны обеспечиваться инженерным оборудованием, отвечать требованиям пожарной безопасности. Качество таких требований в Сирии регулируется государственными стандартами и строительными нормативами, большинство из которых издавалось по аналогии строительных норм СССР в 70–80-е гг. XX в. В современном мире значительным критерием оценки архитектуры выступает маркетинг, где основную роль играют внешний облик и узнаваемость архитектурного объекта [5]. При этом наилучшим способом маркетингового подхода к проектированию гостиниц в Сирии будет симбиоз новейших разработок инженерии и культурных традиций страны.

Создание современного инновационного гостиничного здания в условиях Сирии, по

мнению автора, невозможно без проработки четырех основных формирующих уровней:

конструктивно-технологического – применение новых технологий и рациональных конструктивных решений, основанных на анализе мировой практики;

материально-функционального – наличие материально воплощенного здания гостиницы со своим функциональным зонированием;

художественно-образного – создание уникального художественного решения гостиницы, отличающего ее от зарубежных аналогов;

коммуникационно-средового – органичное включение гостиницы в окружение (природное, городское), создание связей гостиницы с окружающей средой.

Далее рассмотрим подробнее каждый из этих уровней.

Конструктивно-технологические возможности

В настоящее время в зданиях курортных гостиниц имеется ряд неудобств, которые в некоторых случаях обусловлены неудачным архитектурно-планировочным или пространственным решением, а иногда непродуманным использованием местных строительных материалов в их отделке. Так, в последнее время часто неоправданно применяются большие остекленные поверхности, не защищенные от влияния солнечных лучей. Решением этой проблемы могут служить не только козырьки, широкие летние помещения, затеняющие жилые комнаты гостиницы, но и более современный технологический подход – изменяемый фасад. Его применение не только функционально, но и несет в себе определенную философию. Вместо статики в архитектурном облике гостиницы появляется динамика. Такие инновации не только изменяют внешний вид зданий и уменьшают энергозатраты, но и дают возможность для интересной интерпретации элементов традиций и культуры страны. Удачным примером такого сочетания в мировой практике служат башни Аль-Бахар в Абу-Даби (Дубай), построенные по проекту архитекторов Aedis (рис. 1, 2) [6]. Конструкция фасада башен представляет собой «умную кожу», состоящую из 2000 модулей-зонтиков, которые закрываются и открываются в зависимости от положения солнца, создавая

внутри здания комфортный микроклимат даже в сорокоградусную жару. При этом открывающиеся модули по своей форме интерпретируют старинный арабский стиль машрабия.



Рис. 1. Башни Аль-Бахар, Абу-Даби

Fig. 1. Al Bahr Towers, Abu Dhabi

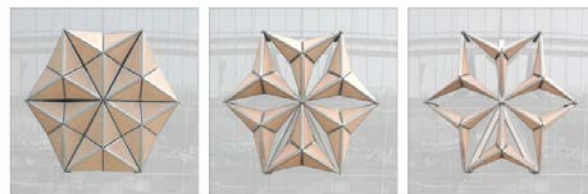


Рис. 2. Схема открывания модулей фасада башни Аль-Бахар, Абу-Даби

Fig. 2. Scheme of facade module opening for Al Bahr Towers, Abu Dhabi

Несомненно, энергосберегающая оболочка здания, наряду со многими другими энергосберегающими технологиями в архитектуре – внедрением нетрадиционных источников электрической энергии, энергоэффективным освещением, автоматизированной системой контроля и управления зданием и т. д. – коренным образом повлияет на дальнейшие технологические и конструктивные особенности при проектировании гостиниц в Сирии.

Материально-функциональные возможности

Современная курортная гостиница выделяется из своей типологической группы улучшенной комфортностью и длительным пребыванием постояльцев на открытом воздухе, что делает организацию ее территории важным ас-

пектом [7]. Выявлено, что при проектировании генерального плана курортной гостиницы большое значение придается легкости ориентации отдыхающих на территории отеля. При этом преследуется цель ясного представления посетителями о назначении всех зон и сооружений. Это достигается четкой функциональной организацией территории [8].

Анализируя генплан гостиницы «Афамия Ротана» (рис. 3, 4), следует отметить, что здесь под открытым небом размещаются сооружения рекреационного (пляжи, скверы во внутренних дворах), спортивно-оздоровительного (спортивные и детские площадки с навесами, открытые бассейны, павильоны для СПА-процедур и массажей), лечебного (питьевые бюветы,

аэрозолярий) и досугового (летний кино-театр, торговые павильоны и т. д.) назначений. При этом учтены особенности климатических факторов региона, предусмотрены навесы и козырьки от чрезмерного солнца и осадков. В условиях жаркого климата на сирийском побережье, где расположена гостиница «Афамия Ротана», уровень застройки часто превышает 40 %. Недостаток природного ландшафта можно восполнить устройством большого количества искусственных водоемов – прудов и фонтанов, а также зелеными поверхностями стен, кровель, откосов и террас. Для курортной гостиницы как нельзя лучше подойдет эксплуатация озелененных покрытий с целью отдыха и занятия спортом.



Рис. 3. Курортная гостиница «Афамия Ротана», г. Латакия, Сирия

Fig. 3. Resort hotel “Afamia Rotana”, Latakia city, Syria



Рис. 4. Генплан курортной гостиницы «Афамия Ротана», Сирия

Fig. 4. Master plan of resort hotel “Afamia Rotana”, Syria

Художественно-образные возможности

С точки зрения выразительности художественного облика, курортные гостиницы Сирии схожи с аналогичными отелями Турции, Израиля, Египта и т. д. Такая схожесть объясняется в первую очередь исторической близостью и едиными корнями культур этих государств [9]. В архитектурно-художественном облике построенной малоэтажной части гостиницы «Порто Тартус», к примеру, сильна традиционная составляющая: арочные проемы, имитация техники каменной кладки «аль-абляк» (горизонтальные ряды цветной кладки), использование местного камня для возведения малоэтажной застройки, облицовка элементов зданий камнем, традиционная терракотово-охристая цветовая палитра фасадов (рис. 5).



Рис. 5. Курортная гостиница «Порто Тартус», г. Тартус, Сирия. Существующие корпуса

Fig. 5. Resort hotel "Porto Tartous", Tartous city, Syria. Existing housings

Но запроектированные многоэтажные корпуса гостиницы несомненно велики по отношению к прибрежным корпусам и окружающей городской застройке (рис. 6). Возможно, благодаря горизонтальным выдвигным корпусам-консолям, пластике фасадов и озеленению террас композиция гостиницы «Порто Тартус» приобрела бы не только индивидуальность и ноты экологической архитектуры, но и сочетала бы традиции и современность.

По мнению автора, наиболее эффективным средством повышения выразительности художественно-образной составляющей архитектуры курортных гостиниц является сочетание мирового опыта и национальных инновационных

технологий в архитектуре с традиционными методиками.



Рис. 6. Курортная гостиница «Порто Тартус», г. Тартус, Сирия. Проектный вид

Fig. 6. Resort hotel "Porto Tartous", Tartous city, Syria. Design view

А именно: учет национальных элементов архитектуры при выборе той или иной схемы объемно-пространственной композиции; предпочтительность ритмического построения фасадов; учет архитектурной масштабности комплекса и окружающей застройки; широкое использование солнцезащитных устройств и летних открытых помещений; предпочтительное использование традиционной цветовой гаммы при решении интерьера; введение в композицию интерьера элементов фитодизайна; широкое использование в экстерьере и интерьере элементов декоративно-прикладного искусства.

Коммуникационно-средовые возможности

Курортные гостиницы в Сирии располагаются как на Средиземноморском побережье вблизи туристических городов, так и автономно в горной местности. Если в первом случае застройка гостиниц должна выгодно выделяться на фоне окружения, то во втором – единение с природным ландшафтом только приветствуется. При этом, решая задачи интенсивного, комплексного использования природно-туристических ресурсов, неизбежно встает вопрос о сохранении и улучшении окружающей природно-ландшафтной среды, которая представляет собой один из самых ценных туристских ресурсов страны. В современных условиях ухудшения экологической ситуации в мире решение данного вопроса очень актуально. На одном из горных участков западной части Сирии расположен горнолыжный курортный отель «Маун-

тин Бриз», где удачно сочетаются принципы экологичности и средового взаимодействия. Гостиница состоит из нескольких жилых корпусов и домиков-бунгало, рассредоточенных на террасированном склоне (рис. 7, 8).



Рис. 7. Курортный отель «Маунтин Бриз», г. Латакия, Сирия.
Расположение корпуса на террасе

Fig. 7. Resort hotel "Mountain Breeze", Latakia city, Syria.
Housing terrace location



Рис. 8. Курортный отель «Маунтин Бриз», г. Латакия, Сирия. Вид на зеленые кровли

Fig. 8. Resort hotel "Mountain Breeze", Latakia city, Syria. Green roof view

Прекрасным примером полного средового слияния в мировой практике может служить «эко-дружественный» отель в г. Сан-Карлос-де-Барилоче (Аргентина), где здание гостиницы вписано в окружающий горный ландшафт (рис. 9) [10].

Следуя мировым тенденциям возврата человека к его природному окружению, современная архитектура чутко отреагировала на изменения. Все большую популярность в мире

набирает концепция продолжения природы в здании, слияние форм и перетекание образов. В Сирии существуют прекрасные возможности для следования этой концепции при проектировании новых гостиниц и реконструкции существующих.



Рис. 9. «Экодружественный» отель сети «Хилтон», «встроенный» в один из холмов на побережье озера, г. Сан-Карлос-де-Барилоче, Аргентина

Fig. 9. "Eco Friendly" hotel (network of "Hilton" hotels), built-in in one of the hills on the coast of the lake, San Carlos de Bariloche, Argentina

ВЫВОД

Мировая практика свидетельствует о том, что жизнеспособность курортной гостиницы базируется на принципе прогрессивности и новизны решений, возможности видоизменения архитектурной формы в ритме движения социальных потребностей. Гостиницы, построенные на курортах Сирии во второй половине XX в. по типовым проектам, схожим, к примеру, с гостиницей «Афамия Ротана», визуально устарели и не представляют какой-либо художественной либо исторической ценности. Поэтому, чтобы сохранить такие здания современными на всем сроке дальнейшей эксплуатации, необходима трансформация их внешнего вида. Для Сирии, где в проектировании в почете традиционный подход, следует деликатно внедрять инновационные технологии на всех уровнях архитектурной составляющей курортных гостиниц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азгальдов, Г. Г. Интеллектуальная собственность, инновации и квалиметрия / Г. Г. Азгальдов, А. В. Костин // Экономические стратегии. 2008. № 2. С. 162–164.

2. Крижановская, Н. Я. Этимология термина «инновации» в архитектурно-градостроительной деятельности [Электронный ресурс] / Н. Я. Крижановская, О. В. Смирнова // *International Scientific Journal*. 2016. № 2. Режим доступа: www.inter-nauka.com/uploads/public/14549359686068.PDF. Дата доступа: 15.05.2016.
3. The Tourism Arrival Movement during, 2009 // Syrian Ministry of Tourism [Electronic resource] // Mode of access: <http://www.syriatourism.org/index.php?module=subjects&func=viewpage&pageid=2848>. Date of access: 05.05.2016.
4. Фоминых, И. Л. Основы проектирования туристских, гостиничных и ресторанных комплексов / И. Л. Фоминых. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2007. С. 26.
5. Потаев, Г. А. Инновации и традиции в современной архитектуре / Г. А. Потаев // *Архитектура и строительные науки*. 2015. № 1, 2 (20, 21). С. 2–4.
6. Al Bahar Towers – современная интерпретация древних технологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.facepla.net/index.php/the-news/tech-news-mnu/3244-al-bahar-towers>. Дата доступа: 17.05.2016.
7. Крамаренко, М. А. Функционально-планировочная организация участка курортной гостиницы / М. А. Крамаренко // *Технические науки – от теории к практике*. 2014. № 36. С. 116–121.
8. Lawson, F. R. *Hotels and Resorts. Planning, Design and Refurbishment* / F. R. Lawson. Boston: Butterworth Architecture, 1995. P. 137.
9. Лобанов, Ю. Н. Отдых и архитектура: будущее и настоящее / Ю. Н. Лобанов. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 102 с.
10. “Eco Friendly” Hilton to be Built in Bariloche, Argentina [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.treehugger.com/natural-sciences/eco-friendly-hilton-to-be-built-in-bariloche-argentina.html>. Дата доступа: 25.04.2016.

Поступила 10.03.2016

Подписана в печать 30.05.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Azgaldov G. G., Kostin A. V. (2008) Intellectual Property, Innovation and Qualimetry. *Ekonomicheskiye Strategii* [Economic Strategies], (2), 162–164 (in Russian).
2. Krizhanovskaya N. Ya., Smirnova O. V. (2016) Etymology of the Term “Innovation” in the Architectural and Town-Planning Activity. *International Scientific Journal*, (2). Available at: www.inter-nauka.com/uploads/public/14549359686068.PDF. (Accessed 15 May 2016) (in Russian).
3. The Tourism Arrival Movement During, 2009. *Syrian Ministry of Tourism*. Available at: <http://www.syriatourism.org/index.php?module=subjects&func=viewpage&pageid=2848>. (Accessed 5 May 2016).
4. Fominykh I. L. (2007). *Design Fundamentals of Tourist, Hotel and Restaurant Complexes*. Vladivostok: Publishing House Vladivostok State University of Economics and Service, 26 (in Russian)
5. Potayev G. A. (2015) Innovations and Traditions in Modern Architecture. *Arkhitektura i Stroitelnye Nauki* [Architecture and Construction Science], 20, 21 (1, 2), 2–4 (in Russian).
6. Al Bahar Towers – a Modern Interpretation of Ancient Technologies. Available at: <http://www.facepla.net/index.php/the-news/tech-news-mnu/3244-al-bahar-towers>. (Accessed 17 May 2016) (in Russian).
7. Kramarenko M. A. (2014) Functional Planning Organization of Resort Hotel’s Site. *Tekhnicheskie Nauki – ot Teorii k Praktike* [Engineering Sciences – from Theory to Practice], (36), 116–121 (in Russian).
8. Lawson F. R. (1995) *Hotels and Resorts. Planning, Design and Refurbishment*. Boston, Butterworth Architecture, 137.
9. Lobanov Yu. N. (1982) *Recreation and Architecture: Future and Present*. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad Branch. 102 (in Russian).
10. “Eco Friendly” Hilton to be Built in Bariloche, Argentina. Available at: <http://www.treehugger.com/natural-sciences/eco-friendly-hilton-to-be-built-in-bariloche-argentina.html>. (Accessed 25 April 2016).

Received: 10.03.2016

Accepted: 30.05.2016

Published online: 28.07.2016

Математическое моделирование гибридных электротехнических систем

Докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый¹⁾, канд. техн. наук, доц. Ю. Н. Петренко¹⁾,
аспиранты Эльзейн Аймад¹⁾, А. С. Абуфанас¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. К электротехническим системам относится большой класс систем, нашедших применение в различных отраслях промышленности и быту, в электрифицированных транспортных объектах и энергетике. Их характерная черта – комбинация непрерывного и дискретного режимов работы, что нашло отражение в появлении относительно нового термина «гибридные системы». Широкий класс гибридных систем – это импульсные преобразователи постоянного тока, работающие в режиме широтно-импульсной модуляции и являющиеся нелинейными системами с переменной структурой. Используя различные приемы линеаризации, можно получить линейные математические модели, которые достаточно точно имитируют поведение таких систем. Однако наличие в математических моделях экспоненциальных нелинейностей создает значительные трудности при реализации системы на цифровых аппаратных средствах. Решение может быть найдено применением аппроксимации показательных функций полиномами первого порядка, что нарушает строгость соответствия аналитической модели характеристикам реального объекта. Существуют два подхода в практике синтеза алгоритмов управления гибридных систем. Первый основан на представлении всей системы дискретной моделью, описываемой разностными уравнениями, и на основе этого – синтез дискретных алгоритмов. Второй подход основан на описании системы дифференциальными уравнениями – синтез непрерывных алгоритмов и дальнейшая реализация их в цифровой вычислительной машине, включенной в контур управления системой. Рассмотрено моделирование гибридной электротехнической системы с помощью дифференциальных уравнений. Пренебрегая длительностью импульсов, поведение компонент вектора фазовых координат гибридной системы предлагается описать стохастическими дифференциальными уравнениями, содержащими в общем случае нелинейные не дифференцируемые случайные функции. Получено векторно-матричное стохастическое уравнение, описывающее динамику процессов, в котором представлены как непрерывная, так и дискретная составляющие, характеризующие амплитудную модуляцию сигналов. На основе математической модели гибридной системы получено уравнение для плотности вероятности распределения фазовых координат системы.

Ключевые слова: математическая модель, гибридная система, пространство состояний, стохастические уравнения

Для цитирования: Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А. А. Лобатый [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 322–328

Mathematical Modeling of Hybrid Electrical Engineering Systems

A. A. Lobaty¹⁾, Yu. N. Petrenko¹⁾, Imad Elzein¹⁾, A. S. Abufanas¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A large class of systems that have found application in various industries and households, electrified transportation facilities and energy sector has been classified as electrical engineering systems. Their characteristic feature is a combination

Адрес для переписки

Лобатый Александр Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25/3,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 266-26-61
mido@bntu.by

Address for correspondence

Lobaty Alexander A.
Belarusian National Technical University
25/3 F. Skorina str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 266-26-61
mido@bntu.by

of continuous and discontinuous modes of operation, which is reflected in the appearance of a relatively new term “hybrid systems”. A wide class of hybrid systems is pulsed DC converters operating in a pulse width modulation, which are non-linear systems with variable structure. Using various methods for linearization it is possible to obtain linear mathematical models that rather accurately simulate behavior of such systems. However, the presence in the mathematical models of exponential nonlinearities creates considerable difficulties in the implementation of digital hardware. The solution can be found while using an approximation of exponential functions by polynomials of the first order, that, however, violates the rigor accordance of the analytical model with characteristics of a real object. There are two practical approaches to synthesize algorithms for control of hybrid systems. The first approach is based on the representation of the whole system by a discrete model which is described by difference equations that makes it possible to synthesize discrete algorithms. The second approach is based on description of the system by differential equations. The equations describe synthesis of continuous algorithms and their further implementation in a digital computer included in the control loop system. The paper considers modeling of a hybrid electrical engineering system using differential equations. Neglecting the pulse duration, it has been proposed to describe behavior of vector components in phase coordinates of the hybrid system by stochastic differential equations containing generally non-linear differentiable random functions. A stochastic vector-matrix equation describing dynamics of the processes has been obtained in the paper. The equation contains both continuous and discrete components, which characterize an amplitude signal modulation. An equation for probability density of phase coordinate distribution in the system has been developed on the basis of a mathematical model for a hybrid system.

Keywords: mathematical model, hybrid system, state space, stochastic equations

For citation: Lobaty A. A., Petrenko Yu. N., Imad Elzein, Abufanas A. S. (2016) Mathematical Modeling of Hybrid Electrical Engineering Systems. *Science & Technique*. 15 (4), 322–328 (in Russian)

Введение

Широкое распространение в различных областях промышленности, на транспорте, в энергетике и других отраслях имеют электротехнические системы, работа которых основана на использовании как непрерывной, так и дискретной обработки сигналов. К таким системам относятся преобразователи постоянного тока в постоянный или переменный ток, имеющие значительное многообразие схемно-технических решений. В соответствии с принятой в настоящее время терминологией данные системы относятся к классу непрерывно-дискретных или гибридных систем, у которых важнейшими являются две характеристики: эффективность преобразования и стабильность.

Многие исследования посвящены оптимизации электротехнических преобразователей [1–5]. По своей природе импульсные преобразователи постоянного тока (ИППТ), работающие в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ), являются нелинейными системами с переменной структурой [1]. Приемы линеаризации нелинейностей математических моделей, предложенные рядом авторов [2, 3, 6], позволили получить линейные инвариантные модели, которые достаточно адекватно характеризуют поведение таких систем. Основные задачи, возлагаемые на регулятор (контроллер)

дискретной части гибридной системы, можно сформулировать следующим образом:

- 1) минимизация статической ошибки на выходе;
- 2) минимизация чувствительности при изменении нагрузки;
- 3) обеспечение стабильности замкнутой системы;
- 4) обеспечение линейности характеристик «вход – выход».

Наиболее значимыми работами в области исследования ИППТ являются публикации Middlebrook (CalTech, Pasadena, California) и Б. П. Соустина (Красноярский политехнический институт), которые были вызваны вполне практическими задачами обеспечения электропитанием космических аппаратов на основе солнечных батарей. Эта задача до сих пор остается актуальной, поскольку солнечная энергетика приобрела глобальное значение как по объему исследований, так и по географии применения. Помимо этого, ИППТ значительно расширили область своего применения за счет необходимости преобразования энергии топливных элементов в электрифицированных транспортных средствах, в том числе в электромобилях различного класса (гибридных, автономных), где необходим обмен энергией в системах «источник – накопитель – потребитель» (электродвигатели приводов колес).

Традиционные методы проектирования контроллеров для ИППТ [3, 7] предусматривают линеаризацию математических моделей и основаны на частотных методах анализа и синтеза. С другой стороны, при рассмотрении динамических характеристик системы необходимо учитывать, что ИППТ являются устройствами с переменной структурой, работа которых основана на применении теории скользящего управления [1]. Главное достоинство скользящего управления в ИППТ заключается в том, что оно обладает свойством робастности к параметрическим изменениям. Так как системы управления ИППТ в настоящее время реализуются на цифровых (дискретных) компонентах, при разработке и исследовании математической модели ИППТ возникает проблема анализа прохождения аналоговых сигналов в системе.

Математическая модель электротехнической системы

Для наиболее распространенных ИППТ (повышающие, понижающие и комбинированные), имеющих два устойчивых состояния, в промежутках положения силового ключа «включен – выключен» модель пространства состояний имеет вид [2, 3]

$$x = \begin{cases} B_1 X + b_1 U, & t \in [nT_s, (n+D)T_s] \\ B_2 X + b_2 U, & t \in [(n+D)T_s, (n+1)T_s] \end{cases}, \quad (1)$$

где X – вектор фазовых координат ИППТ, зависящий от конкретной схемы преобразователя; U – вектор входных сигналов; D – скважность силового ключа; B_1, B_2, b_1, b_2 – матрицы коэффициентов.

Положим, что входной сигнал ИППТ является медленно изменяющейся функцией по сравнению с остальными переменными. Обозначим скважность ключа на n -м интервале как $D(n)$. Тогда можно записать переменные состояния для начала цикла коммутации в виде [3]

$$x(n+1) = \exp(B_2(1-D_n)T_s) \times (\exp(B_1 D_n T_s) X(n) + Q_1 U) + Q_2 U, \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \int_0^{D_n T_s} (\exp(b_1 t)) b_1 dt; \\ Q_2 &= \int_0^{(1-D_n)T_s} (\exp(b_2 t)) b_2 dt. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При наличии в системе обратной связи скважность $D(n)$ определяется работой регулятора. В этом случае в дискретную модель ИППТ вводится переменная, характеризующая изменение скважности $D(n)$, которая является входом преобразователя. Граничное значение скважности может быть определено из выражения [6]

$$i_1((n+D)T_s) = i^*. \quad (4)$$

Переменные состояния в момент выключения ключа ИППТ можно определить как функции скважности и состояния в начале цикла переключения из выражения

$$\begin{aligned} x(n+D) &= \exp(B_1 D_n T_s) X(n) + \\ &+ \exp(B_1 D_n T_s - i) X(n) B_1^{-1} b_1 U. \end{aligned} \quad (5)$$

Это позволяет определить ограничение скважности на основе переменных состояния только в начале цикла [7, 8]

$$\sigma(X(nT_s), D_n) = 0. \quad (6)$$

Заметим, что аппроксимация нелинейностей в (2) и (6) отсутствует. Эти выражения достаточно строго представляют характеристики силовой части ИППТ. В свою очередь, реализация представленной модели из-за наличия в ней экспоненциальных составляющих представляет значительные трудности.

Упрощение реализации данной модели средствами цифровой техники в [3] предлагается производить путем линейной аппроксимации показательных функций. Однако при этом теряется аналитическая строгость модели ИППТ в смысле соответствия реальным характеристикам. Поэтому рассмотрим альтернативный подход, заключающийся в построении усредненной модели в пространстве состояний [3, 4]. Этот подход основан на линеаризации «малых»

сигналов преобразования, имеющих место при работе ИППТ. Принципиальное отличие заключается в том, что ШИМ-сигнал, характеризующийся временем «включенного состояния» и временем «отключенного состояния», рассматривается как совокупность независимых входных переменных. Это позволяет представить динамическую модель ИППТ при переменной частоте, рассматривая частоту как входной сигнал. Здесь уместно упомянуть о возможности применения контроллеров различной архитектуры построения: на основе ПИД-контроллера или на линейно-квадратичной гауссовой аппроксимации нелинейностей [6]. Заслуживает внимания также подход, основанный на рассмотрении стохастических свойств системы.

Математическая модель гибридной стохастической системы

Существуют два подхода в практике синтеза гибридных систем. Первый основан на представлении всей системы дискретной моделью, описываемой разностными уравнениями, и на основе этого – синтез дискретных алгоритмов. Второй подход основан на описании системы дифференциальными уравнениями – синтез непрерывных алгоритмов и дальнейшая реализация их в цифровой вычислительной машине, включенной в контур управления. Оба подхода широко используются, имея при этом свои достоинства и недостатки.

Рассмотрим описание гибридной стохастической системы с помощью дифференциальных уравнений. Пренебрегая длительностью импульсов, поведением компонент вектора фазовых координат системы $X = [x_1, \dots, x_n]^T$, гибридную электротехническую систему в общем случае можно описать стохастическими дифференциальными уравнениями вида [9]

$$\dot{x}_i(t) = a_i(X, t) + \sum_{j=1}^n b_{ij}(X, t)v_j(X, t) + \sum_{j=1}^n h_{ij}(t)\xi_j(t) \quad (i = \overline{1, n}), \quad (7)$$

где a_i, b_{ij}, h_{ij} – в общем случае нелинейные функции; $\xi_j(t)$ – случайные функции времени

(шумы); $v_j(X, t)$ – последовательность δ -функций, моменты времени появления которых t_{jk} зависят от X ,

$$v_j(X, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{jk}\delta(t - t_{jk}), \quad (8)$$

где $\delta(t - t_{jk})$ – δ -функции с амплитудами c_{jk} , возникающие в моменты времени t_{jk} .

В векторно-матричной форме стохастическое уравнение, описывающее динамику процессов, происходящих в системе управления, имеет вид

$$\dot{X}(t) = A(X, t) - B(X, t)v(X, t, T) + H(t)\xi(t), \quad (9)$$

где $A(X, t)$ – в данном случае векторная функция, отображающая наличие непрерывной составляющей процесса $X(t)$; $B(X, t)$ – матричная функция, отображающая дискретную составляющую с амплитудной модуляцией; $H(t)$ – матрица коэффициентов; $v(X, t, T)$ – вектор дискретных воздействий, отображающий дискретную составляющую с частотной модуляцией; T – период следования импульсов (период дискретизации).

В частном случае, если $B(X, t) = 0$ и $\xi(t)$ – вектор белых шумов, процесс $X(t)$ будет непрерывным марковским. Из (9) следует, что математическая модель системы с амплитудной модуляцией имеет вид

$$\dot{X}(t) = A(X, t) + B(X, t)v(t, T) + H\xi(t). \quad (10)$$

Соответственно система с фазовой модуляцией описывается уравнением вида

$$\dot{X}(t) = A(X, t) + Bv(X, t, T) + H\xi(t). \quad (11)$$

Заметим, что для описания системы с ШИМ в уравнениях (7) и (9) необходимо учесть последовательность как положительных, так и отрицательных δ -функций, отстоящих друг от друга на ширину модулируемого импульса.

Наиболее полной характеристикой процесса $X(t)$ является плотность распределения вероятности (ПРВ) $f(X, t)$. Если в уравнении (4) $B(X, t) = 0$, то $f(X, t)$ при отсутствии поглощаю-

щих границ удовлетворяет уравнению Фоккера – Планка – Колмагорова вида [9]

$$\dot{f}(X, t) = -\nabla_x^T \pi(X, t). \quad (12)$$

Здесь $\nabla_x^T = \left[\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right]$ – векторный

оператор дифференцирования; $\pi(X, t)$ – вектор плотности потока вероятности с составляющими

$$\pi_k(x, t) = a_k(X, t) f(X, t) - \frac{1}{2} \sum_{v=1}^n \frac{\partial}{\partial x_k} [h_{kv}(t) f(X, t)], \quad (13)$$

где $a_k(X, t)$ – составляющие вектора $A(X, t)$; $h_{kv}(t)$ – элементы матрицы $H(t)$.

Если в уравнении (9) $B(X, t) \neq 0$, то при условии рассмотрения стохастических интегралов в симметризованной форме Стратоновича это означает, что каждый δ -импульс в момент t_k вызывает скачкообразные изменения амплитуды $x_k(t)$ на величину c_{jk} .

Компоненты векторно-матричного уравнения (9) описывают кусочно-непрерывные марковские процессы со скачком в моменты времени t_k . Для таких процессов в [10] получено уравнение для ПРВ, которое как при амплитудной, так и при частотной модуляции имеет вид

$$\dot{f}(X, t) = -\nabla_x^T \pi(X, t) - v(X, t) f(X, t) + \sum_{j=1}^n v_j [w_j(X, t)] \left| \frac{\partial w_j(X, t)}{\partial X} \right| f(w_j(X, t)). \quad (14)$$

Здесь $v(X, t) = \sum_{j=1}^n v_j(X, t)$ – суммарная ин-

тенсивность (частота) квантования; v_j – интенсивность квантования в потоках входных дискретных воздействий; $w_j(X, t) = X(t) - b_j(X, t)$, где $b_j(X, t) = [b_{1j}(X, t), b_{2j}(X, t), \dots, b_{nj}(X, t)]^T$ – совокупность векторных функций, столбец с индексом j матрицы $B(t)$ ($j = \overline{1, n}$).

Таким образом, матричная функция $B(X, t)$ с элементами $b_{ij}(X, t)$ ($i, j = \overline{1, n}$) разбита на

совокупность векторных функций $b_j(X, t)$;

$\left| \frac{\partial w_j(X, t)}{\partial X} \right|$ – якобиан функции $w_j(X, t)$.

Если имеет место только амплитудная модуляция, то входящие в уравнение (14) функции v не зависят от X , т. е. $v(X) = v$. Для систем с частотной модуляцией третье слагаемое в правой части уравнения (14) имеет вид

$$\sum_{j=1}^n v_j(X + b_j) f(X + b_j).$$

Уравнения для вероятностных моментов первого и второго порядков определяются из (14). Умножив обе части (14) на x_i и проинтегрировав их по всем составляющим вектора X в бесконечных пределах, получим дифференциальное уравнение для математического ожидания i -й фазовой координаты гибридной системы

$$\dot{m}_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \pi_i(X, t) dX - v(X, t) m_i(t) + \sum_{j=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} v_j [w_j(X, t)] \left| \frac{\partial w_j(X, t)}{\partial X} \right| f(w_j(X, t)) dX. \quad (15)$$

В (15) учтено, что:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i \dot{f}(X, t) dX = \dot{m}_i(t); \quad (16)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i \nabla_x^T \pi(X, t) dX = - \int_{-\infty}^{\infty} \pi_i(X, t) dX. \quad (17)$$

Уравнения для корреляционных моментов фазовых координат гибридной системы получаются умножением обеих частей (14) на произведение $(x_i - m_i)(x_r - m_r)$ и интегрированием в бесконечных пределах:

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_{ir}(t) = & \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - m_i) \pi_i(X, t) dX - \\ & - \int_{-\infty}^{\infty} (x_r - m_r) \pi_r(X, t) dX - v(X, t) \Theta_{ir}(t) + \\ & + \sum_{j=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} v_j (x_i - m_i)(x_r - m_r) \left| \frac{\partial w_j(X, t)}{\partial X} \right| \times \end{aligned}$$

$$\times f(w_j(X, t))dX. \quad (18)$$

В (18) обозначены:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (x_i - m_i)(x_r - m_r) \dot{f}(X, t) dX = \dot{\Theta}_{ir}(t); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - m_i)(x_r - m_r) \nabla_x^T \pi(X, t) dX = \\ = - \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - m_i) \pi_r(X, t) dX - \\ - \int_{-\infty}^{\infty} (x_r - m_r) \pi_i(X, t) dX. \end{aligned} \quad (20)$$

Решая дифференциальные уравнения (15) и (18) с заданными начальными условиями, можно определить математические ожидания и корреляционные моменты гибридной системы. Так как для вычисления входящих в (15) и (18) интегралов необходимо знать функцию ПРВ $f(X, t)$, приходится применять ее аппроксимацию. В большинстве практических задач лучше всего подходит гауссова двухмоментная аппроксимация $f(X, t)$. В некоторых случаях для вычисления интегралов приходится раскладывать $f(X, t)$ в функциональный ортонормированный ряд по центральным моментам высших порядков или по кумулянтам (семиинвариантам) случайного процесса на основе полиномов, соответствующих некоторой производящей функции [11]. Если выполняется разложение ПРВ по центральным моментам на основе нормального распределения, то получается ряд Грама – Шарлье, состоящий из членов, убывающих неравномерно. Быстро сходящимся рядом является ряд Эджворта, представляющий собой разложение ПРВ по семиинвариантам.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная аналитическая математическая модель гибридной системы, представляющая собой марковский стохастический процесс разрывного типа, отражает основные свойства такой системы при различной форме модуляции сигнала и позволяет учесть как ди-

намические свойства, так и воздействие случайных факторов.

2. Полученное обобщенное уравнение для плотности вероятности фазовых координат является основой для корреляционного анализа гибридных систем. На основе этого выражения можно найти обобщенное уравнение для апостериорной плотности вероятности фазовых координат, которое дает возможность при разработке гибридных систем определять их оптимальную структуру и параметры при заданном критерии качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Utkin, V. I., Sliding Mode Control in Electromechanical Systems / V. I. Utkin, V. J. Guldner, J. X. Shi. London, U.K.: Taylor & Francis, 1999. 350 p.
2. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
3. Application of Neural Networks and State-Space Averaging to a DC/DC PWM Converters in Sliding-Mode Operation / J. Mahdavi [et al.] // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2005. Vol. 10, No 1. P. 60–67.
4. Modeling, Control and Implementation of DC-DC Converters for Variable Frequency Operation / R. Priewasser [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29, No 1. P. 287–301.
5. Белов, Г. А. Структурные модели и исследование динамики импульсных преобразователей / Г. А. Белов // Электричество. 2008. № 4. С. 47–49.
6. Bass, R. M. Switching Frequency Dependent Averaged Models for PWM DC-DC Converters / R. M. Bass, B. Lehman // IEEE Transactions on Power Electronics. 1996. Vol. 11, No 3. P. 89–98.
7. Shen, Z. A Multimode Digitally Controlled Boost Converter with PID Autotuning and Constant Frequency/Constant Off-Time Hybrid PWM Control / Z. Shen, N. Yan, H. Min // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. Vol. 26, No 9. P. 2588–2598.
8. Rajasekaran, V. Bilinear Discrete-Time Modeling for Enhanced Stability Prediction and Digital Control Design / V. Rajasekaran, J. Sun, B. S. Heck // IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Vol. 18, No 1. P. 381–389.
9. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. М.: Наука, 1993. 270 с.
10. Лобатый, А. А. Аналитическое моделирование дискретных систем с фазовым управлением / А. А. Лобатый, В. Л. Бусько, Л. В. Русак // Доклады БГУИР. 2008. Т. 33, № 3. С. 103–110.
11. Пугачев, В. С. Теория стохастических систем / В. С. Пугачев, И. Н. Сеницын. М.: Логос, 2004. 1000 с.

Поступила 25.05.2015

Подписана в печать 28.07.2015

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Utkin V. I., Guldner V. J., Shi J. X. (1999) *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. London, U.K.: Taylor & Francis. 350.
2. Meleshin V. I. (2005) *Transistor Converters*. Moscow, Tekhnosfera. 632 (in Russian).
3. Mahdavi J., Nasiri M. R., Agah A., Emadi A. (2005) Application of Neural Networks and State-Space Averaging to DC/DC PWM Converters in Sliding-Mode Operation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10 (1), 60–67. DOI: 10.1109/TMECH.2004.842227.
4. Priewasser R., Agostinelli M., Unterrieder C., Marsili S., Huemer M. (2014) Modeling, Control and Implementation of DC-DC Converters for Variable Frequency Operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (1), 287–301. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2248751.
5. Belov G. A. (2008) Structure Modeling and Study of Pulse Converter Dynamics. *Elektrichestvo* [Electricity], (4), 47–49 (in Russian).
6. Bass R. M., Lehman B. (1996) Switching Frequency Dependent Averaged Models for PWM DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11 (3), 89–98. DOI: 10.1109/63.484421.
7. Shen Z., Yan N., Min H. (2011) A Multimode Digitally Controlled Boost Converter with PID Autotuning and Constant Frequency/Constant Off-Time Hybrid PWM Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26 (9), 2588–2598. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2111464.
8. Rajasekaran V., Sun J., Heck B. S. (2003) Bilinear Discrete-Time Modeling for Enhanced Stability Prediction and Digital Control Design. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18 (1), 381–389. DOI: 10.1109/TPEL.2002.807167.
9. Kazakov I. E., Artemiev V. M., Bukhalev V. A. (1993) *Analysis of Random Structure Systems*. Moscow, Nauka. 270 (in Russian).
10. Lobaty A. A., Busko V. L., Rusak L. V. (2008) Analytical Modeling of Discrete Systems with Phase Control. *Doklady BGUIR* [Proceedings of Belarusian State University of Informatics and Electronics], 33 (3), 103–110 (in Russian).
11. Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. (2004) *Theory of Stochastic Systems*. Moscow, Logos. 1000 (in Russian).

Received: 25.05.2015

Accepted: 28.07.2015

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-329–334

УДК 621.382.049.774.004.58

Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии

В. А. Солодуха¹⁾, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. А. И. Белоус¹⁾, канд. техн. наук Г. Г. Чигирь¹⁾

¹⁾ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Предложен метод измерения глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин, основанный на использовании оже-спектрометра с прецизионным распылением поверхностных слоев кремния и регистрацией интенсивности выхода оже-электронов. Для измерения глубины нарушенного слоя с помощью оже-спектроскопии снимается зависимость количества выходящих оже-электронов от времени распыления (профиль), и затем эта зависимость анализируется. Количество кремния в нарушенном слое меньше, чем в объеме. По мере углубления нарушенный слой уменьшается, что соответствует увеличению плотности атомов в одиночном слое. Сущность метода заключается в том, что нарушенный слой удаляется распылением пучком ионов, а выявление границы раздела осуществляется путем регистрации интенсивности выхода оже-электронов с распыляемой поверхности до достижения ею величины, равной интенсивности выхода оже-электронов для монокристаллического кремния. Регистрация интенсивности выхода оже-электронов с поверхности кремния при удалении поверхностных слоев кремния позволяет эффективно контролировать наличие нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины. Причем локальность контроля по глубине из-за особенностей метода оже-спектроскопии составляет около 1,0 нм. Интенсивность выхода оже-электронов определяется на оже-спектрометре автоматически, и по мере удаления нарушенного слоя она постепенно возрастает. Глубину нарушенного слоя определяют измерением высоты ступеньки, образованной в результате удаления нарушенного слоя с поверхности кремниевой пластины. Метод оже-спектроскопии обеспечивает эффективный контроль глубины повреждений поверхности на этапах изготовления кремниевых пластин и интегральных микросхем. Диапазон измерения глубины нарушений 0,001–1,000 мкм.

Ключевые слова: кремниевая пластина, нарушенный слой, оже-электроны, глубина нарушений

Для цитирования: Солодуха, В. А. Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии / В. А. Солодуха, А. И. Белоус, Г. Г. Чигирь // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 329–334

Depth Measurement of Disrupted Layer on Silicon Wafer Surface using Auger Spectroscopy Method

V. A. Solodukha¹⁾, A. I. Belous¹⁾, G. G. Chyhir¹⁾

¹⁾JSC “Integral” – Holding managing company “Integral” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper proposes a method for depth measurement of a disrupted layer on silicon wafer surface which is based on application of Auger spectroscopy with the precision sputtering of surface silicon layers and registration of the Auger electron yield intensity. In order to measure the disrupted layer with the help of Auger spectroscopy it is necessary to determine dependence of the released Auger electron amount on sputtering time (profile) and then the dependence is analyzed. Silicon amount in the disrupted layer is less than in the volume. While going deeper the disruptive layer is decreasing that corresponds to an increase of atom density in a single layer. The essence of the method lies in the fact the disruptive layer is removed by ion beam sputtering and detection of interface region is carried out with the help of registration of the Auger

Адрес для переписки

Солодуха Виталий Александрович
ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»
ул. Казинца, 121а,
220108, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 212-32-32
office@integral.by

Address for correspondence

Solodukha Vitaliy A.
JSC “Integral” – Holding managing company “Integral”
121a Kazinza str.,
220108, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 212-32-32
office@integral.by

electron yield intensity from the sputtered surface up to the moment when it reaches the value which is equal to the Auger electron yield intensity for single-crystal silicon. While removing surface silicon layers the registration of the Auger electron yield intensity from silicon surface makes it possible to control efficiently a presence of the disrupted layer on the silicon wafer surface. In this case depth control locality is about 1.0 nm due to some peculiarities of Auger spectroscopy method. The Auger electron yield intensity is determined automatically while using Auger spectrometer and while removing the disrupted layer the intensity is gradually increasing. Depth of the disrupted layer is determined by measuring height of the step which has been formed as a result of removal of the disrupted layer from the silicon wafer surface. Auger spectroscopy methods ensures an efficient depth control surface disruptions at the manufacturing stages of silicon wafers and integrated circuits. The depth measurement range of disruptions constitutes 0.001–1.000 μm .

Keywords: silicon wafer, disrupted layer, Auger electron, depth of disruption

For citation: Solodukha V. A., Belows A. I., Chyhir G. G. (2016) Depth Measurement of Disrupted Layer on Silicon Wafer Surface using Auger Spectroscopy Method. *Science & Technique*. 15 (4), 329–334 (in Russian)

Введение

Основная тенденция развития современной микроэлектроники – постоянное и стремительное уменьшение проектных норм. Интенсивный переход к субмикронным технологиям изготовления микросхем (МС) обуславливает повышенные требования к используемым материалам. Поэтому формирование кремниевых пластин с улучшенными свойствами в тонком приповерхностном слое становится актуальным. Глубина повреждений поверхности (глубина нарушенного слоя) кремниевых пластин – важнейший их параметр, который необходимо контролировать при производстве МС. Повреждения поверхности возникают как в результате механических воздействий на стадии изготовления пластин, так и в результате радиационных процессов, в частности при ионной имплантации легирующей примеси. Знание глубины нарушенного слоя позволяет оптимизировать процессы обработки кремния и выбрать наилучший из них, что в свою очередь повышает выход годных и уменьшает расход материалов.

Существует большое количество методов контроля и определения параметров нарушенного слоя [1–4]. Однако отсутствуют универсальные методы контроля глубины нарушенного слоя, его отдельных составных зон и дефектов кристаллической решетки кремния. Процесс исследования глубины нарушенного слоя кремниевых пластин состоит из нескольких этапов, включающих применение как методов, чувствительных к дефектам кристаллической структуры, так и методов послойного удаления этих нарушений. Большие нарушения, например, после резки слитка на пластины, где глубина нарушенного слоя составляет десятки микрон, можно измерять сравнительно простыми мето-

дами с достаточной точностью. Нарушенный слой после шлифовки составляет 1–5 мкм, и его измерения уже не так однозначны. В этих случаях следует использовать более современные методы с большим разрешением. Для контроля глубины нарушенного слоя кремниевых пластин после полировки (менее 0,5 мкм) практически не существует количественных методов его оценки. Известные современные методы весьма трудоемки и не пригодны для промышленного использования. Объектом исследования являлся нарушенный слой на поверхности кремниевых пластин, предназначенных для изготовления субмикронных микросхем. Цель работы – разработка эффективного метода контроля глубины нарушенного слоя кремниевых пластин после химико-механической полировки с применением современных аналитических средств.

Физические основы и сущность метода

Предложен новый метод количественного контроля глубины нарушенного слоя кремниевых пластин после полировки для изготовления МС субмикронных размеров. Метод основан на использовании оже-спектроскопии с прецизионным распылением поверхностных слоев кремния и регистрацией интенсивности выхода оже-электронов с поверхности пластины [5–7]. Для измерения глубины нарушенного слоя с помощью оже-спектроскопии снимается зависимость количества выходящих оже-электронов от времени распыления (профиль), и затем эта зависимость анализируется (рис. 1). Количество кремния в нарушенном слое меньше, чем в объеме. По мере углубления нарушенный слой уменьшается, что соответствует увеличению плотности атомов в одиночном слое. На графиках рис. 1 это соответствует плавному выходу на плато.

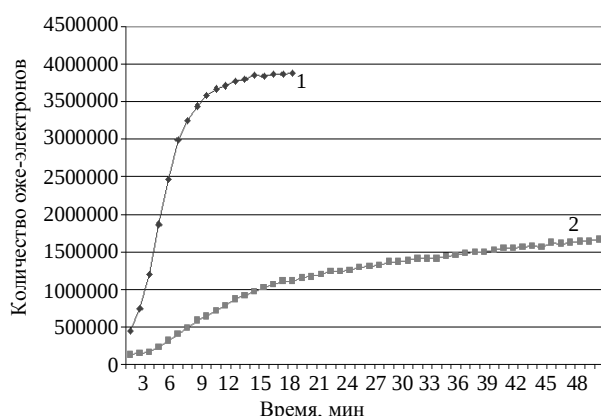


Рис. 1. Зависимость количества выходящих оже-электронов от времени распыления для пластин после полировки (1) и шлифовки (2)

Fig. 1. Dependence of released Auger electron amount on sputtering time for wafers after polishing (1) and grinding (2)

Сущность метода заключается в том, что нарушенный слой удаляется распылением пучком ионов, а выявление границы раздела осуществляется путем регистрации интенсивности выхода оже-электронов с распыляемой поверхности до достижения ею величины, равной интенсивности выхода оже-электронов для монокристаллического кремния. Глубина нарушенного слоя определяется измерением высоты ступеньки, образованной в результате удаления нарушенного слоя с поверхности кремниевой пластины [8–11].

Регистрация интенсивности выхода оже-электронов с поверхности кремния при удалении поверхностных слоев кремния позволяет эффективно контролировать наличие нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины. Причем локальность контроля по глубине (усреднение по глубине) из-за особенностей метода оже-спектроскопии составляет около 1,0 нм. Интенсивность выхода оже-электронов определяется на оже-спектрометре автоматически, и по мере удаления нарушенного слоя она постепенно возрастает. После удаления нарушенного слоя интенсивность выхода достигает максимальной величины, равной значению для монокристаллического кремния (кремний без нарушенного слоя) с погрешностью по глубине, не превышающей $\pm 1,0$ нм. Дальнейшее удаление поверхностных слоев кремния прекращается. Таким образом, на поверхности образца формируется ступенька: на верхней ее части находится исходная поверх-

ность анализируемой кремниевой пластины с нарушенным слоем, а на нижней – поверхность с удаленным нарушенным слоем. Величина этой ступеньки равна глубине нарушенного слоя.

Использование метода оже-спектроскопии для определения глубины нарушенного слоя кремниевых пластин обусловлено двумя обстоятельствами:

- возможностью последовательного удаления тонких, вплоть до монокристаллического, слоев;
- выход оже-электронов зависит от количества (плотности) анализируемого материала на поверхности. Так как в нарушенном слое имеется множество дефектов, его плотность будет меньше, чем монокристаллического материала, и следовательно, будет меньше количество выходящих оже-электронов.

Глубину нарушенного слоя определяли по ступеньке на профилометре после полного удаления нарушенного слоя распылением. Выход на монокристаллический кремний определяли следующим образом. Производили контроль за интенсивностью выхода оже-электронов после каждого шага распыления. Когда выход электронов за три шага не изменялся более чем на один процент, распыление прекращали, извлекали образец из камеры спектрометра и измеряли глубину кратера на профилометре. Профилометр Talystep, который использовался в работе, имеет максимальное увеличение по вертикали 2000000 крат. При данном увеличении минимальная цена деления составляет 0,5 нм/мм. Изображение реальной ступеньки величиной 100 нм на диаграммной ленте самописца профилометра приведено на рис. 2. Данную ступеньку измеряли при увеличении 200000 крат, и ее размер на ленте профилометра составляет 20 мм. Эти данные наглядно иллюстрируют возможности профилометра.

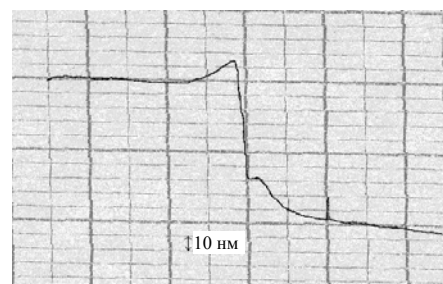


Рис. 2. Профиль ступеньки на диаграммной ленте профилометра

Fig. 2. Step profile on a profilometer chart tape

Оже-спектрометр РНІ-660 позволяет менять скорость распыления в очень широких диапазонах: от десятых долей нанометра в минуту до 100 нм/мин. Поэтому, если глубина нарушенного слоя мала, изменением скорости распыления можно обнаружить различия в способах даже химико-динамической полировки.

Метрологические характеристики метода

Для определения случайной составляющей измерений глубины кратера провели серию измерений на одном образце с глубиной кратера примерно 50 нм. Увеличение профилометра устанавливалось 1000000 крат. Величина среднеквадратичного отклонения результатов измерений не превышала 1,00 нм. По этой причине случайная составляющая ошибки единичного измерения при доверительной вероятности 0,95 не превышала 4,00 %. При уменьшении глубины нарушенного слоя погрешность возрастает. Однако метод позволяет определять глубину нарушенного слоя начиная с величины 1,00 нм. Меньше глубина нарушенного слоя на кремниевой полированной пластине практически быть не может, так как на воздухе быстро образуется пленка естественного оксида кремния толщиной 1,00–2,00 нм, которая тоже входит в нарушенный слой.

Глубину нарушенного слоя можно определить по известной скорости распыления. Для этого необходимо предварительно выбрать оптимальные режимы распыления образца, определить скорость распыления для данного режима и в дальнейшем использовать фиксированные режимы распыления и значение величины скорости. Скорость распыления можно определить двумя способами:

- распылением слоя известной толщины. Например, толщину слоя двуокиси кремния можно достаточно точно определить методом эллипсометрии. Учитывая, что скорость распыления двуокиси кремния практически одинакова с кремнием, а граница раздела «кремний – двуокись кремния» уверенно определяется на оже-спектрометре, скорость распыления в данном случае находится достаточно точно;

- многократным распылением кремниевой пластины, измерением глубины ступенек на профилометре и расчетом скорости распыления статистической обработкой данных.

Получается, что нет необходимости постоянно использовать профилометр для измере-

ния глубины нарушенного слоя. Достаточно настроить оже-спектрометр на известную скорость распыления и, определив время выхода на монокристаллический кремний по снятому профилю, вычислить глубину нарушенного слоя.

Для определения оптимальной скорости распыления провели ряд экспериментов. В ходе испытаний варьировали параметры электронной пушки: ток ионного пучка, растр (развертка), угол наклона образца. В результате выбрали скорость распыления 2,2 нм/мин. При этом режимы распыления были следующими: растр $3 \times 3 \text{ мм}^2$, ускоряющее напряжение 3,5 кВ, ток ионного пучка 30 нА, угол между ионным пучком и поверхностью образца 10° .

Предложенный количественный контроль глубины нарушенного слоя имеет следующие характеристики: диапазон измерения глубины нарушенного слоя составляет 0,001–1,000 мкм, разрешение по глубине до 1,000 нм. Данный метод может использоваться в сочетании со сканирующей зондовой микроскопией.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Зависимости выхода оже-электронов от времени распыления для двух кремниевых пластин, изготовленных на разных заводах и имеющих различные режимы финишной обработки поверхности, приведены на рис. 3.

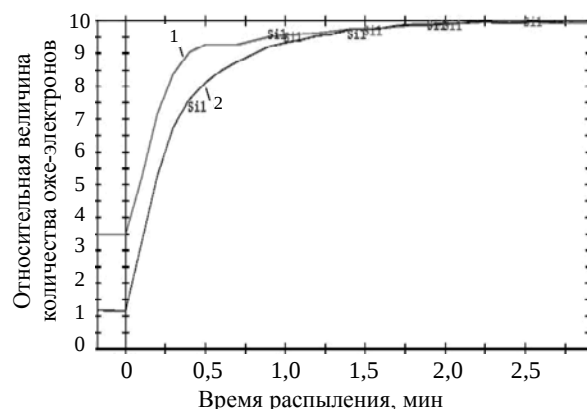


Рис. 3. Зависимость количества оже-электронов от времени распыления пластин № 1, 2 после разных режимов финишной полировки: № 1 – пластина изготовлена на зарубежном предприятии; № 2 – то же в Беларуси

Fig. 3. Dependence of Auger electrons amount on sputtering time for wafers Nos 1, 2 after different modes of final polishing: No 1 – wafer manufactured at a foreign enterprise; No 2 – wafer manufactured in the Republic of Belarus

Анализ данных рис. 3 показывает, что глубина нарушенного слоя не полностью отражает качество подготовки поверхности. Время выхода на монокристаллический кремний для пластин № 1, 2 одинаково и составляет 1,75 мин. Это означает, что глубина нарушенного слоя для двух пластин одинакова и равна 3,80 нм. Получается, что по глубине нарушенного слоя практически нет различия между пластинами. Из данных рис. 3 следует, что нарушенные слои пластин отличаются. В области нарушенного слоя для пластины № 1 интенсивность выхода оже-электронов существенно выше и, можно полагать, что она более совершенной в сравнении с пластиной № 2. По этой причине предложено дополнительно оценивать качество подготовки поверхности по площади над полученной кривой профиля распыления. Целесообразно предварительно перевести количество выходящих оже-электронов в относительную величину. Для этого надо измеренное количество оже-электронов разделить на количество оже-электронов, выходящих с монокристаллического кремния, и затем произвести расчет площади. После проведения расчетов получается, что для пластины № 1 площадь над полученной кривой профиля распыления равна $0,191 \text{ м}^2$, а для пластины № 2 – $0,323 \text{ м}^2$. Можно сделать вывод, что качество поверхности пластины № 1 лучше, чем пластины № 2. Сравнение выхода годных субмикронных микросхем показывает, что на пластинах группы № 1 выход годных выше, чем на пластинах группы № 2, что обусловлено различием в качестве подготовки поверхности пластин.

Использование оже-спектроскопии для измерения глубины нарушенного слоя кремниевых пластин после шлифовки и особенно после резки нецелесообразно по нескольким причинам: во-первых, необходимо резко увеличить скорость и время распыления; во-вторых, существуют методы для контроля глубины нарушенного слоя поверхности после резки и шлифовки, менее трудоемкие и достаточно точные [3]. Определение разброса глубины нарушенного слоя от пластины к пластине для различных производителей пластин показало, что минимальное значение глубины нарушенного слоя для полированных пластин составляет 3 нм, а максимальное не превышает 100 нм.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод измерения глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин, основанный на использовании оже-спектрометра с прецизионным ионным распылением поверхностных слоев кремния и регистрацией интенсивности выхода оже-электронов. Диапазон измерения глубины нарушений 0,001–1,000 мкм. Разрешение по глубине 1,000 нм.

2. При равных глубинах нарушенного слоя качество подготовки поверхности кремниевой пластины предложено оценивать по площади над полученной кривой профиля распыления.

3. Метод является эффективным при оптимизации процессов финишной подготовки поверхности кремниевых пластин в микроэлектронном производстве, выборе оптимальных технологических процессов, способствует снижению расхода технологических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы контроля нарушенных слоев при механической обработке монокристаллов / А. И. Татаренков [и др.]. М.: Энергия, 1978. 64 с.
2. Луфт, Б. Д. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Б. Д. Луфт. М.: Радио и связь, 1982. С. 16–18.
3. Test Method for Measuring the Depth of Crystal Damage of a Mechanically Worked Silicon Slice Surface by Angle Polishing and Defect Etching: Standard SEMI MF950–1106 // Annual Book of ASTM Standard. USA: American Society for Testing and Materials, 1999. Vol. 10.05: Electronics II (Electrical Insulation and Electronics). P. 315.
4. Химическая обработка в технологии ИМС / В. П. Василевич [и др.]. Полоцк: ПГУ, 2001. С. 174–185.
5. Берченко, Н. Н. Методы электронной и ионной спектроскопии для исследования поверхности и границ раздела в полупроводниковой электронике. Ч. 1 / Н. Н. Берченко, Н. Р. Аигина // Зарубежная электронная техника. 1986. № 9 (304). 86 с.
6. Берченко, Н. Н. Методы электронной и ионной спектроскопии для исследования поверхности и границ раздела в полупроводниковой электронике. Ч. 2 / Н. Н. Берченко, Н. Р. Аигина // Зарубежная электронная техника. 1986. № 10 (305). 85 с.
7. Холева, Л. Д. Методы электронной спектроскопии для анализа материалов электронной техники / Л. Д. Холева, В. С. Шкиров // Зарубежная электронная техника. 1979. № 4 (199). С. 3–33.
8. Способ измерения глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевой полупроводниковой пластины: пат. 5907 Респ. Беларусь, МПК C1 H 01 L 21/66 /

Г. Г. Чигирь, Л. П. Ануфриев, В. А. Ухов, Л. П. Пеньков; дата публ. 30.03.2004.

9. Измерение глубины повреждений поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии и ионного распыления / А. С. Турцевич [и др.] // Радиационная физика твердого тела: тр. 20-го Междунар. совещания, 6–8 июля 2010 г., Севастополь, Украина. М.: НИИ ПМТ, 2010. Т. 2. С. 556–562.
10. The Measurement of the Depth of Damaged Layer on Surface of Silicon Wafers by the Method of Auger Spectroscopy / A. Turtsevich [et al.] // New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation (NEET 2013): Proceedings of the 8th International conference, Zakopane, Poland, June 18–21, 2013. Warsaw: Pol. Acad. of Sciences, Inst. of Physics, 2014. P. 17.
11. Analysis of the Disrupted Layer on the Surface of the Silicon Wafers, Based on the Ion-Sputtering and Auger-Spectroscopy / V. A. Solodukha [et al.] // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. of the 9th Int. Conf. Zakopane, Poland, 23–26 June 2015. Lublin: Lublin University of Technology, 2015. P. 21.

Поступила 07.09.2015

Подписана в печать 08.11.2015

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Tatarenkov A. I., Enisherlova K. L., Rusak T. F., Gridnev V. N. (1978) Methods for Control of Disarrayed Layers During Mechanical Machining of Mono-Crystals. Moscow, Energia. 64 (in Russian).
2. Luft B. D. (1982) *Physical and Chemical Methods for Machining of Semiconductor Surface*. Moscow, Radio i Svyaz, 16–18 (in Russian).
3. Standard SEMI MF950–1106. Test Method for Measuring the Depth of Crystal Damage of a Mechanically Worked Silicon Slice Surface by Angle Polishing and Defect Etching. *Annual Book of ASTM Standard, 10.05. Electronics II (Electrical Insulation and Electronics)*. American Society for Testing and Materials, 1999, 315.
4. Vasilevich V. P., Kisel A. M., Medvedeva A. B., Plebanovich V. I., Rodionov Iu. A. (2001) *Chemical Treatment in IMS Technology*. Polotsk: Polotsk State University, 174–185 (in Russian).
5. Berchenko N. N., Aigina N. R. (1986) Methods for Electronic and Ionic Spectroscopy to Investigate Surface and Interfaces in Semiconductor Electronics. Part 1. *Zarubezhnaya Elektronnaya Tekhnika* [Foreign Electronic Equipment], 304 (9). 86 (in Russian).
6. Berchenko N. N., Aigina N. R. (1986) Methods for Electronic and Ionic Spectroscopy to Investigate Surface and Interfaces In Semiconductor Electronics. Part 2. *Zarubezhnaya Elektronnaya Tekhnika* [Foreign Electronic Equipment], 305 (10). 85 (in Russian).
7. Kholeva L. D., Shkirov V. S. (1979) Methods for Electronic Spectroscopy to Analyze Materials of Electronic Equipment. *Zarubezhnaya Elektronnaya Tekhnika* [Foreign Electronic Equipment], 199 (4), 3–33 (in Russian).
8. Chigir G. G., Anufriev L. P., Ukhov V. A., Penkov L. P. (2004) Method for Measuring Depth of Disarrayed Layer on the Surface of Silicon Semiconductor Plate. Patent Republic of Belarus No 5907 (in Russian).
9. Turtsevich A. S., Shvedov S. V., Chigir G. G., Ukhov V. A. (2010) Measurement of Damage Depth on Silicon Plate Surface while Using Methods of Auger Spectroscopy and Ion Sputtering. *Radiatsionnaya Fizika Tverdogo Tela: tr. 20-go Mezhdunar. Soveshchaniia. T. 2* [Radiation Physics of Solid Body: Proceedings of 20th International Meeting, July 6–8, 2010, Sevastopol, Ukraine. Vol. 2]. Moscow, Research Institute of Advanced Materials and Technologies, 556–562 (in Russian).
10. Turtsevich [et al.] (2014) The Measurement of the Depth of Damaged Layer on Surface of Silicon Wafers by the Method of Auger Spectroscopy. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET 2013): Proceedings of the 8th International Conference, Zakopane, Poland, June 18–21, 2013*. Warsaw: Pol. Acad. of Sciences, Inst. of Physics, 17.
11. Solodukha V. A., Shvedov S. V., Ponaryadov V. V., Pili-penko V. A., Chyhir R. R. (2015) Analysis of the Disrupted Layer on the Surface of the Silicon Wafers, Based on the Ion Sputtering and Auger Spectroscopy. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. of the 9th Int. Conf. Zakopane, Poland, 23–26 June 2015*. Lublin: Lublin University of Technology, 21.

Received: 07.09.2015

Accepted: 08.11.2015

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-335–344

УДК 681.5.09

Анализ информационных факторов в проектировании интеллектуальных мехатронных систем

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Гулай¹⁾, В. М. Зайцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Достижение основного результата при функционировании интеллектуальных мехатронных систем с цифровым управлением предлагается оценивать получаемым информационным эффектом. При этом в качестве основополагающего информационного фактора, влияющего на процесс проектирования мехатронной системы, рассматривается общность информационных требований с ее интеллектуальными компонентами. В связи с этим выделены параметры, с помощью которых можно достаточно полно охарактеризовать процессы получения и использования системной информации в объеме интеллектуальной мехатронной системы. Информационным критерием эффективности управления выбрана степень соответствия параметров векторов управления, синтезируемых системой, и результатов идентификации ее текущих состояний. Для формирования возможных состояний используется набор значений ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров объекта управления и мехатронной системы в пределах требуемых допусков. Показано, что при комплексном информационном описании системы целесообразно использование экспертной оценки вероятности выбора допустимых векторов управления, которые обеспечивают перевод системы в благоприятные состояния. Данный подход позволил выделить основные информационно-технические характеристики интеллектуальной мехатронной системы: структурного построения (информационно-техническая совместимость и информационное согласование ее компонентов); объекта управления (неопределенность его состояния и информационный вектор, информационная емкость мехатронной системы); управляющих воздействий (их иерархия и энтропийный баланс процесса управления, управленческий ресурс мехатронной системы); результата функционирования (информационный эффект и критерий эффективности управления, вероятностный выбор состояний системы). По результатам выполненного анализа можно указать наиболее эффективные направления практического использования предложенного информационного подхода в создании интеллектуальной мехатронной системы: сопоставление альтернативных проектных решений на основе анализа расчетных оценок безусловной энтропии объекта управления и системы; моделирование с целью принятия окончательного системного варианта при построении цифрового блока управления создаваемой системы; комплексное применение знаний экспертов, наиболее полное введение знаний в процесс проектирования мехатронной системы.

Ключевые слова: интеллектуальная система, цифровое управление, мехатронная система, информационный фактор, вектор управления

Для цитирования: Гулай, А. В. Анализ информационных факторов в проектировании интеллектуальных мехатронных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 335–344

Analysis of Information Factors for Designing Intellectual Mechatronic System

A. V. Gulai¹⁾, V. M. Zaytsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper proposes to evaluate achievement of main results in operation of intellectual mechatronic systems with digital control by the obtained information effect. In this respect, common information requirements with intellectual

Адрес для переписки

Гулай Анатолий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-25
is@bntu.by

Address for correspondence

Gulai Anatoliy V.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-25
is@bntu.by

components are considered as a basic information factor which influences on the process of mechatronic system designing. Therefore, some parameters have been accentuated and they can help to provide rather complete description of the processes used for obtaining and using systematic information within the volume of the intellectual mechatronic system. Conformity degree of control vector parameters synthesized by the system and identification results of its current states have been selected as an information criterion of the control efficiency. A set of expected probability values for location of each parameter of an control object and a mechatronic system within the required tolerances has been used for formation of possible states. The paper shows that when a complex information description of the system is used then it is expedient to use an expert assessment of selection probability for allowable control vectors which ensure a system transfer to favorable states. This approach has made it possible to pinpoint main information and technical specifications of the intellectual mechatronic system: structural construction (informational and technical compatibility and information matching of its components); control object (uncertainty of its state and information vector, information capacity of the mechatronic system); control actions (their hierarchy and entropic balance of control process, managerial resource of mechatronic system); functioning result (informational effect and control efficiency criterion, probabilistic selection of system states). In accordance with the fulfilled analysis it is possible to note the most effective directions for practical use of the proposed informational approach for creation of the intellectual mechatronic system: comparison of alternative design solutions based on the analysis of calculation assessments on unconditional entropy of the control object and the system; simulation with the aim to accept a final systematic option while constructing digital controlling block of the created system; complex application of experts' knowledge, most comprehensive introduction of knowledge to the process of mechatronic system designing.

Keywords: intelligent system, digital control, mechatronic system, information factor, control vector

For citation: Gulai A. V., Zaytzev V. M. (2016) Analysis of Information Factors for Designing Intellectual Mechatronic System. *Science & Technique*. 15 (4), 335–344 (in Russian)

Введение

Развитие интеллектуальных мехатронных систем идет по пути непрерывного усложнения логических структур и постоянного расширения функциональных возможностей востребованных практикой устройств с цифровым управлением. Это, в свою очередь, приводит к увеличению объемов циркулирующей в интеллектуальных системах и перерабатываемой ими системной информации. В связи с этим появляется необходимость в определении наиболее общих информационных подходов, технологий и характеристик для анализа работы мехатронных систем. Такие подходы должны охватывать этапы проектирования систем, чтобы заложить необходимые требования к системе на исходной стадии ее построения. Далее применяемые технологии анализа систем должны достаточно объективно и полно характеризовать процессы получения и обработки системной информации. Необходимо также, чтобы с использованием обобщенных информационных характеристик оценивался результат воздействия системы на управляемый объект.

В данной статье при выборе и определении вышеуказанных подходов учитывается, что эффективность функционирования интеллектуальных систем в существенной мере определяется применяемыми при их создании информа-

ционными технологиями. Поэтому в качестве основополагающего фактора, влияющего на процессы проектирования мехатронной системы с цифровым управлением, рассматривается общность информационных требований к ее интеллектуальным компонентам. Информационным критерием эффективности управления в каждом цикле функционирования интеллектуальной мехатронной системы считается степень соответствия параметров векторов управления результатам идентификации текущих состояний системы. Достижение основного результата при функционировании указанных систем также предлагается оценивать получаемым информационным эффектом. Данный подход позволил выявить основные информационно-технические характеристики интеллектуальной мехатронной системы, которые отражают особенности структурного построения ее компонентов, специфику объекта управления и правила выработки управляющих воздействий.

Значение информационных факторов в проектировании интеллектуальных мехатронных систем

В качестве основополагающего фактора, влияющего на процессы проектирования мехатронной системы с цифровым управлением, предлагается рассматривать общность информационных требований к ее интеллектуальным

ми компонентами (подсистемами): сенсорным модулем, блоком цифрового управления, исполнительным механизмом и системным каналом обмена данными [1]. Технические характеристики основных компонентов такой системы должны обеспечивать их информационную совместимость на всех этапах осуществляемых преобразований: функционально-информационного (I); собственно информационного (II); информационно-функционального (III) (рис. 1). Проблема информационной совместимости модулей мехатронной системы рассматривается при анализе всех видов сигналов, отображающих возможные состояния и воздействия в системе.

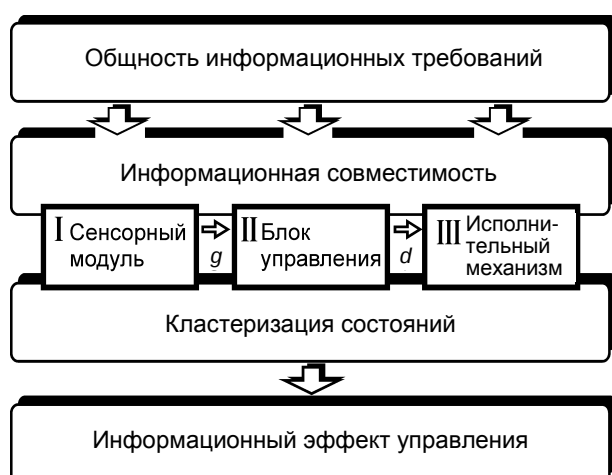


Рис. 1. Информационные факторы в процессе функционирования интеллектуальной мехатронной системы: g – информационный вектор параметров состояний объекта управления; d – вектор параметров ответных системных воздействий (вектор управления)

Fig. 1. Information factors in the operational process of intellectual mechatronic system: g – information vector of state characteristics for control object; d – vector of characteristics for response systematic actions (control vector)

Обязательным условием обеспечения согласованного функционирования составных частей интеллектуальной мехатронной системы является выполнение в процессе проектирования системы всех частных требований, предъявляемых к ее компонентам и к основным аспектам их информационно-технической совместимости. Однако даже при полном соблюдении указанных требований в мехатронной системе возможны информационные рассогласования

ее элементов. Для выполнения анализа данной проблемы целесообразно представить определение основных терминов, касающихся вопросов информационно-технической совместимости и семантического согласования компонентов мехатронной системы.

Определение 1. Под информационно-технической совместимостью компонентов интеллектуальной мехатронной системы будем понимать комплекс ее свойств, за счет которых между указанными компонентами обеспечивается бесконфликтная реализация процессов передачи данных по системным каналам, а также процессов приема данных, их синхронизации и обработки на смысловом уровне. При этом предполагается, что построение и организация функционального взаимодействия аппаратных и программных составных частей интеллектуальной мехатронной системы отвечает общим требованиям семиуровневой модели взаимосвязи открытых систем Международной организации по стандартизации.

Непредсказуемые смысловые изменения информации, циркулирующей в интеллектуальной мехатронной системе, и, как следствие, негативные отклонения в поведении объекта управления и самой системы наблюдаются в результате различных возмущающих воздействий. Противодействие отрицательным явлениям на разных этапах функционирования системы и на различных уровнях ее структуры может быть реализовано за счет применения специальных методов из арсенала современных интеллектуальных технологий. Использование интеллектуальных модулей в составе мехатронной системы позволяет обеспечить достижение взаимного информационного согласования ее элементов.

Определение 2. Под семантическим информационным согласованием составных частей интеллектуальной мехатронной системы понимается обеспечение (формальное описание в программных компонентах и практическое соблюдение в аппаратных блоках) условий бесконфликтной реализации на смысловом уровне процессов передачи и приема данных по системным каналам, а также синхронизации данных и их обработки.

Разнообразие возможных состояний XS^* объекта управления и мехатронной системы

определяется комбинациями в информационном векторе объекта управления текущих состояний основных составных частей с учетом влияния на них различных возмущающих факторов. Очевидно, что множество возможных состояний XS^* по своей природе является бесконечным. В числе возмущающих факторов могут быть флуктуации параметров объекта управления, изменения электромагнитных и механико-климатических условий, вариации параметров сенсорного и актюаторного оборудования интеллектуальных модулей. Кроме того, к таким факторам относятся воздействия помех на электронные компоненты цифрового блока управления, а также на системные каналы передачи информационных векторов g и векторов управления d . Здесь следует уточнить, что понимается под информационным вектором объекта управления.

Определение 3. Информационный вектор объекта управления – это совокупность параметров (количественных и качественных, приборных и экспертных), которая отображает в интеллектуальной мехатронной системе фактическое текущее состояние указанного объекта.

Для реализации процессов цифрового управления в соответствии с целевыми задачами мехатронной системы множество XS^* нуждается в предварительной кластеризации. Эта процедура выполняется для того, чтобы каждому выделенному кластеру состояний можно было поставить в соответствие более предпочтительное состояние или обеспечить неизменность текущего состояния. В случае необходимости кластеризация позволяет осуществить требуемый переход между состояниями системы с помощью определенных сигналов и команд управления. Такой подход предполагает в каждом цикле управления выполнение операций сопоставления фактической информации текущего вектора g с результатами предварительной кластеризации. Это, в принципе, обеспечивает фактическое дискретное преобразование возможных исходных состояний объекта управления и системы, а также использование полученного дискретного базиса для идентификации состояний и выработки параметров (координат) векторов управления d .

Предположим, что при анализе процесса функционирования мехатронной системы S вы-

полнена предварительная экспертная кластеризация множества XS^* и в соответствии с целевыми задачами выделено дискретное подмножество наиболее существенных и практически осуществимых системных состояний:

$$XS = \{XS_i\}, i = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$XS \in XS^*. \quad (2)$$

В указанном множестве XS на основе наборов целевых критериев, характерных для систем конкретного функционального назначения, априорно может быть выделено дискретное подмножество наиболее предпочтительных (или благоприятных) состояний:

$$X = \{X_j\}, j = 1, 2, \dots, m; \quad (3)$$

$$X \in XS \in XS^*. \quad (4)$$

Параметры элементов структуры мехатронной системы с цифровым управлением должны, с одной стороны, обеспечивать полноценное отображение выделенных дискретных состояний, а с другой – наиболее правдоподобную идентификацию состояний по текущим параметрам информационных векторов g [2, 3]. Опираясь на предложенную характеристику процесса идентификации состояний объекта управления, можно говорить и о таком его свойстве, как неопределенность данных состояний.

Определение 4. Неопределенностью состояния объекта управления можно назвать такую ситуацию, в которой значения параметров, характеризующих существенные для интеллектуальной мехатронной системы свойства объекта, своевременно не измерены или не обновлены в текущем цикле функционирования, что затрудняет или исключает возможность выработки системой адекватных управляющих воздействий. В идеальном случае требуется, чтобы неопределенность относительно текущего состояния объекта управления и системы полностью отсутствовала, а оценка нахождения объекта и системы в фактическом состоянии выполнялась с вероятностью, равной 1.

В качестве меры информационной эффективности управления в каждом цикле работы интеллектуальной мехатронной системы целесообразно выбрать степень соответствия синтезированных параметров вектора управления d

результатам идентификации текущего состояния системы. Управляемость и соответствующее ограничение возможного разнообразия в поведении объекта управления и системы могут быть достигнуты исключительно за счет выработки системой достаточного количества различных векторов управления d , реализуемых с помощью наборов сигналов и команд. Учитывая важность представлений о результативности функционирования системы, следует определить содержание понятия «информационный критерий эффективности управления».

Определение 5. Информационный критерий эффективности управления представляет собой количественное выражение степени соответствия синтезированных в интеллектуальной мехатронной системе параметров вектора управления результатам идентификации текущего состояния системы.

Будем полагать, что мехатронная система при обработке очередного вектора управления d_t целенаправленно переходит из текущего состояния XS_i в более предпочтительное состояние X_j или сохраняется в текущем состоянии. При этом векторы управления выбираются из допустимого множества $D = \{d_t\}$, $t = 1, 2, \dots, w$. В соответствии с формальным представлением закона У. Р. Эшби о необходимом разнообразии системное управление осуществимо и действенно только при соблюдении условия энтропийного баланса [4]:

$$H(X) \geq H(XS) - H(D) + H(XS/D); \quad (5)$$

$$H(D) - H(XS/D) = I(D, XS), \quad (6)$$

где $H(X)$, $H(XS)$, $H(D)$ – значения безусловной энтропии, характеризующие соответственно разнообразие множества выборов наиболее предпочтительных состояний X , разнообразие множества возможных состояний объекта управления и системы XS и множества векторов управления D ; $H(XS/D)$ – условная энтропия, характеризующая неопределенность состояния объекта после выбора и обработки исполнительным механизмом вектора управления; $I(D, XS)$ – количество информации в цифровом блоке управления относительно множества XS .

Условие энтропийного баланса устанавливает тот факт, что при управлении энтропию

состояний объекта можно понизить на величину информации, содержащейся в блоке управления. В информационном аспекте это условие указывает на невозможность снижения энтропии при отсутствии управления, что в известной мере соответствует второму началу термодинамики о невозможности невосполняемого кругового энергообмена. Поэтому для обеспечения управления необходимо принятие таких системных проектных решений, которые приводят к ограничению возможного разнообразия в поведении объекта управления и системы и, следовательно, минимизируют энтропию $H(X)$. Очевидным способом уменьшения энтропии $H(X)$ является снижение безусловной энтропии $H(XS)$ объекта управления и мехатронной системы.

Оценка состояний объекта управления в интеллектуальной мехатронной системе

На основе предварительного моделирования процессов функционирования мехатронной системы S , последующего системного анализа и экспертной кластеризации могут быть выделены и специфицированы существенные системоразличимые состояния $\{XS_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, а также определены ожидаемые вероятности $\{PS_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, нахождения системы в этих состояниях. Для оценки функционально полного множества возможных состояний необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$\sum_{i=1}^n PS_i = 1. \quad (7)$$

В данном случае важнейшее значение имеет схема кластеризации, от которой существенно зависит построение алгоритмов функционирования цифрового блока в цепи управления системы (рис. 2). Анализ показывает, что эффективных результатов при построении сложных систем можно ожидать, прежде всего, в случае использования эвристико-алгоритмических методов и приемов. Для выполнения кластеризации состояний XS предлагается применить достаточно универсальный допусковый принцип, многократно апробированный в различных непрерывных системах контроля электромеханического и электронного оборудования [5].

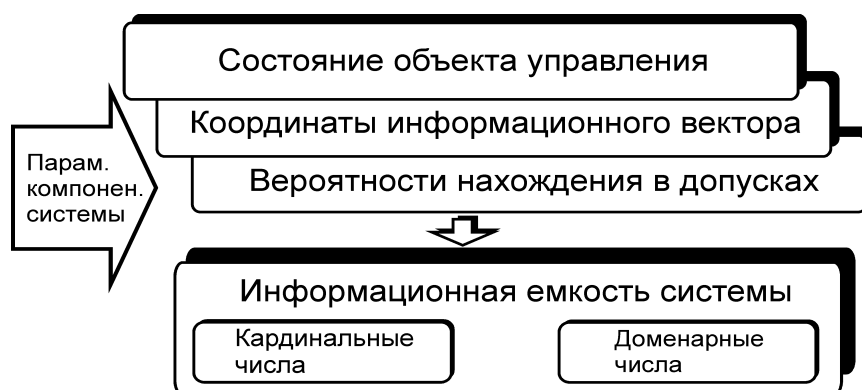


Рис. 2. Схема кластеризации системоразличимых состояний объекта управления в интеллектуальной мехатронной системе

Fig. 2. Scheme of clusterization for system distinguishing states of control object in the intellectual mechatronic system

Состояние объекта управления и мехатронной системы в каждом цикле функционирования можно оценивать по текущим значениям параметров (координат) информационных векторов

$$g_v = (\alpha_{1v}, \alpha_{2v}, \alpha_{3v}, \dots, \alpha_{rv}), \quad (8)$$

которые формируются измерительными трактами системы на основании сигналов сенсоров. В состав вектора g должны включаться только существенные параметры (в терминологии У. Р. Эшби – «главные параметры» [4]). На стадии системного анализа целесообразно полагать координаты данного вектора взаимно независимыми, что соответствует наихудшим условиям оценки энтропии $H(XS)$. При этом для формирования возможных состояний XS необходимо предложить набор значений ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах (границах) требуемых допусков

$$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_r, \quad (9)$$

где $\{\pi_z\}$; $z = 1, 2, \dots, r$ – вероятности благоприятных событий, для которых $\alpha_{zv} \in (\alpha_{zh}, \alpha_{zv})$; α_{zh}, α_{zv} – требуемый нижний и верхний пределы допуска параметра α_z для $z = 1, 2, \dots, r$ [5].

Состав «главных параметров» и пределы требуемых допусков могут быть заданы экспертами – высококвалифицированными системными аналитиками в области создания и использования мехатронных систем конкретного функционального назначения. Набор ожидае-

мых вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах требуемых допусков устанавливается путем моделирования процессов формирования и получения векторов $g_v = (\alpha_{1v}, \alpha_{2v}, \alpha_{3v}, \dots, \alpha_{rv})$ блоком цифрового управления. Определяющими факторами, которые оказывают существенное влияние на вероятности $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_r$, являются чувствительность и разрешающая способность сенсоров, точностные параметры трактов измерения, достоверность передачи параметров по системным каналам, техническая надежность аппаратуры, алгоритмы оцифровки и обработки сенсорной информации.

Определение 6. Информационную емкость интеллектуальной мехатронной системы можно представить как совокупность текущих параметров, которые характеризуют существенные свойства объекта управления и самой системы, подлежат контролю, обработке, накоплению или обновлению в циклах функционирования системы для обеспечения синтеза адекватных управляющих воздействий. Указанная совокупность текущих параметров R определяется составом существенных свойств системных объектов и внешних явлений, кардинальными и доменарными числами

$$R = \sum_{i=1}^a \mu_i r_i + \sum_{k=1}^b r_k. \quad (10)$$

Каждый системный объект i -го типа $O_i = \{O_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, \mu_i$, характеризуется кардинальным числом μ_i , которое задает

количество экземпляров O_{ij} объекта типа i , и доменарным числом r_i , соответствующим количеству существенных физических или иных свойств объектов этого типа. Внешние явления $\{E_k\}$, $k = 1, 2, \dots, b$, представляются в системе единичными экземплярами ($\mu_k = 1$), количество существенных свойств каждого из которых определяется доменарным числом r_k .

Рассмотрим достаточно интересный с теоретической и практической точек зрения случай, когда в системе обеспечивается управление одним условным объектом, а параметры внешних явлений приведены к параметрам данного условного объекта: $a = 1$; $\mu = 1$; $b = 0$; $R = r$ (табл. 1). При размерности r информационного вектора g максимальное количество дискретных состояний условного объекта управления и системы, которые могут быть выделены при использовании предлагаемой схемы кластеризации, равно 2^r . Первое состояние XS_1 множества XS в данном примере задается как состояние нахождения всех параметров вектора g в пределах требуемых допусков. Такое состояние является единственным и в циклах управления реализуется с вероятностью PS_1 . Ко второй группе состояний $XS_2, XS_3, \dots, XS_{(r+1)}$ могут быть отнесены состояния нахождения в необходимых пределах всех параметров вектора g , за исключением любого одного параметра. Количество таких состояний r и вероятность их реализации для $p = 1, 2, 3, \dots, r$ равны PS_i при $i = 2, 3, \dots, r, r+1$. К третьей группе относятся состояния $XS_{(r+2)}, XS_{(r+3)}, \dots, XS_{(r(r-1)/2!+2)}$ нахождения всех параметров вектора g , за исключением любых двух параметров, в пределах требуемых допусков. Количество таких состояний равно $r(r-1)/2!$, и они реализуются с вероятностями PS_i при $i = r+2, r+3, r(r-1)/2!+2$ для $p = 1, 2, 3, \dots, r$; $q = 1, 2, \dots, r$; $p \neq q$.

Аналогичным образом строятся остальные группы состояний, имеющие номера 4, 5, ..., $(r-1)$, за исключением последней (четвертой) группы. К данной группе может быть отнесено состояние (с номером r) нахождения всех параметров вектора g вне пределов требуемых допусков. Такое состояние является единственным, и в циклах управления вероятность его реализации равна PS_r . Во всех выражениях для вероятности реализации состояний интеллектуальной мехатронной системы N – коэффициент нормирования.

Таблица 1

Вероятности нахождения параметров мехатронной системы в пределах требуемых допусков
Probabilities for location of mechatronic parameters within the required tolerances

Группа состояний	Вероятность реализации состояний интеллектуальной мехатронной системы
I	$PS_1 = N \prod_{k=1}^r \pi_k$
II	$PS_i = N (1 - \pi_p) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{r-1} \pi_k$ $i = 2, 3, \dots, r, r+1$
III	$PS_i = N (1 - \pi_p) (1 - \pi_q) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq p, k \neq q}}^{r-2} \pi_k$ $i = r+2, r+3, r(r-1)/2!+2$
IV	$PS_r = N \prod_{k=1}^r (1 - \pi_k)$
$N = \frac{1}{\left[\prod_{k=1}^r \pi_k + \sum_{p=1}^r (1 - \pi_p) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{r-1} \pi_k + \dots + \prod_{k=1}^r (1 - \pi_k) \right]}$	

Энтропия $H(XS)$, характеризующая разнообразие множества возможных состояний объекта управления и системы XS , задается следующим соотношением [6]:

$$H(XS) = - \sum_{i=1}^{n=2} PS_i \log PS_i. \quad (11)$$

Если координатами информационного вектора g являются только «главные параметры», а второстепенные, малозначащие параметры данного вектора экспертами (системными аналитиками) из рассмотрения исключены, то фактическое уменьшение энтропии $H(XS)$ принципиально возможно следующими способами:

- огрублением информации и искусственным уменьшением размерности r информационного вектора экспертным путем;
- за счет дополнительной иерархической кластеризации состояний на втором или на более высоких уровнях и введения иерархии уровней управляющих воздействий.

Определение 7. Под иерархией управляющих воздействий интеллектуальной мехатронной системы будем понимать упорядоченное множество уровней функционирования нисходящей информационной цепи, объединенных причинно-следственными связями, предполагая, что управляющие воздействия на каждом из нижележащих уровней синтезируются в зависимости от воздействий, сформированных на вышележащих уровнях.

Первый способ уменьшения энтропии $H(XS)$ может быть реализован путем установления практической границы системной различимости состояний, при этом специфицируются первое состояние, состояния второй группы, состояния третьей группы и так далее до границы различимости. Остальные состояния заменяются одним укрупненным состоянием с суммарной вероятностью реализации. Такой способ ведет к упрощению алгоритмов функционирования цифрового блока управления и сокращению общего времени выработки ответных реакций. Правомочность указанного проектного решения определяется экспертами в зависимости от конкретного функционального назначения мехатронной системы. Однако следует отметить, что этот прием уменьшения энтропии допустим не для всех классов и типов мехатронных систем.

Второй способ ведет к усложнению структуры множества XS и, следовательно, к неминусуемому усложнению структуры всей системы, что сопровождается увеличением по времени продолжительности выработки управляющих воздействий.

Вероятностный выбор благоприятных состояний интеллектуальной мехатронной системы

Моделирование процессов управления позволяет оценить вероятности $\{P_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, n = 2^r$; $j = 1, 2, \dots, m$, выбора в циклах управления наиболее благоприятных, по мнению системных аналитиков, состояний

$$\sum_{j=1}^m P_{ij} = 1. \quad (12)$$

Достижение требуемых состояний реализуется за счет целенаправленного применения различных вариантов системных решений и соответствующих им управляющих векторов

и воздействий. При комплексном информационном описании процессов управления целесообразно использование метода экспертного задания для различных пар системных состояний $\{XS_i, X_j\}$ вероятностей $\{P_{t/ij}\}$, $t = 1, 2, \dots, w$; $i = 1, 2, \dots, n = 2^r$; $j = 1, 2, \dots, m$, выбора в циклах управления допустимых векторов управления $d_t \in D$, которые обеспечивают перевод системы в благоприятные состояния. В результате этого может быть сформирован вероятностный параллелепипед, на основе которого порождаются основные компоненты энтропийного баланса процессов управления в интеллектуальной мехатронной системе (рис. 3). При этом число возможных управляющих воздействий определяется произведением $n = 2^r m w$.

Определение 8. Энтропийный баланс процессов управления в интеллектуальной мехатронной системе – это представление полной энтропии дерева выбора управляющих воздействий D для реализации всех пар возможных состояний $\{XS_i, X_j\}$ системы в виде суммы частных энтропий поддеревьев $\{D, XS_i, X_j\}$.

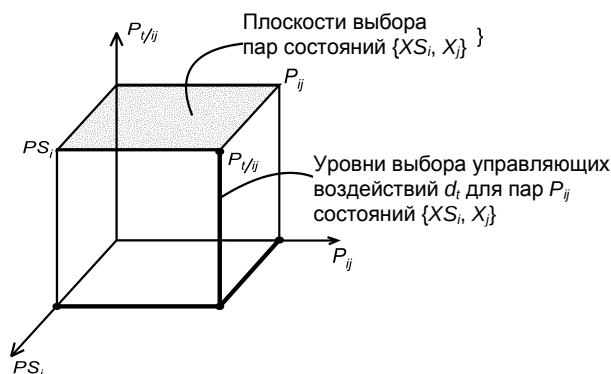


Рис. 3. Вероятностный параллелепипед порождения основных компонентов энтропийного баланса процессов управления в интеллектуальной мехатронной системе

Fig. 3. Probabilistic parallelepiped for origination of main components of entropy balance in control processes of intellectual mechatronic system

Значение полной энтропии выбора управляющих воздействий из множества D для обеспечения всех пар состояний $\{XS_i, X_j\}$ может быть получено путем сложения частных энтропий по всем элементам множества D, X, XS

$$H(D) = - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2} P_{t/ij} \log P_{t/ij}, \quad (13)$$

где $P_{t/ij}$ – полная вероятность выбора управляющего воздействия d_t в точке $\{XS_i, X_j\}$.

Определение 9. Вероятностным выбором благоприятных состояний интеллектуальной мехатронной системы будем называть решения на ее перевод в более благоприятные состояния (информационные, энергетические, позиционные) или на сохранение неизменным ее текущего состояния на основе оценки априорной вероятности нахождения системы в текущем состоянии.

На практике для большинства интеллектуальных мехатронных систем вероятностные процессы выбора благоприятных системных состояний и векторов управления с приемлемым уровнем приближения могут считаться статистически независимыми. Поэтому можно сделать допущение, что справедливо равенство $P_{tij} = P_{t/ij}P_{ij}$, и в этом случае выражение (13) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} H(D) &= - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2} (P_{t/ij}P_{ij}) \log(P_{t/ij}P_{ij}) = \\ &= - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2} (P_{t/ij}P_{ij}) \log P_{t/ij} - \\ &\quad - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2} (P_{t/ij}P_{ij}) \log P_{ij}. \end{aligned} \quad (14)$$

С целью минимизации энтропии $H(X)$ требуется принятие проектных решений, при которых $H(D) \rightarrow H(XS)$. Необходимо отметить, что использование предложенной схемы кластеризации приводит к сужению области допустимого выбора более благоприятного состояния X_j для некоторого исходного состояния XS_i в плоскостях $\{XS_i, X_j\}$. Указанная область выбора ограничивается номерами групп, к которым относятся состояния XS_i . Следует учитывать также, что рациональное управление d_t должно сопровождаться переводом объекта и системы в состояния только тех групп, которые имеют меньшие номера. В связи с этим в техническом отношении наиболее приемлемо не формальное изменение уровня неопределенности в выборе векторов управления, а планомерные системотехнические действия по расширению управленческого ресурса, включающего весь диапазон возможных приемов и способов управления. На основании [2, 3], а также с учетом вышеизложенного определим понятие управленческого ресурса интеллектуальной мехатронной системы.

Определение 10. Под управленческим ресурсом интеллектуальной мехатронной системы понимается спектр (общее количество и возможное разнообразие) способов управления, применяемых в системе для обеспечения процессов манипулирования информационными и энергетическими потоками, системными очередями и каналами передачи данных, аппаратными, программными и информационными компонентами.

Условная энтропия $H(XS/D)$ указывает на сохранение неопределенности в состоянии объекта и системы после выбора и отработки вектора управления. Значение условной энтропии определяется уровнем достоверности адекватной отработки управляющих воздействий на основе параметров вектора управления; данный уровень достоверности характеризуется энтропией $H(h/D)$. На величину условной энтропии оказывает влияние также уровень достоверности передачи по каналам системы параметров векторов управления d_t для которого характерна энтропия $H(\Delta d/d)$. Таким образом, выражение для $H(XS/D)$ принимает следующий вид:

$$H(XS/D) = H(h/D) + H(\Delta d/d), \quad (15)$$

где

$$H(h/D) = - \sum_{t=1}^w \sum_{l=1}^L Q_{lt} \log Q_{lt}; \quad (16)$$

Q_{lt} – вероятность адекватной отработки исполнительным механизмом параметра β_{lt} вектора управления d_t .

Принятая оценка неопределенности состояния интеллектуальной мехатронной системы может быть положена в основу определения информационной эффективности ее функционирования.

Определение 11. Информационный эффект функционирования интеллектуальной мехатронной системы заключается в снижении неопределенности ее информационного состояния, достигаемом в результате реализации синтезированных управляющих воздействий.

Существенно повысить достоверность передачи информационных векторов g и векторов управления d позволяет применение эффективных корректирующих кодов, выбор которых зависит от типа системных каналов (волоконно-оптических, проводных или радиоканалов). Однако при этом также не обеспечивается абсолютная достоверность передаваемой информации – во всех случаях $H(\Delta d/d) \neq 0$ [7].

Следует особо подчеркнуть, что составляющую $H(XS/D)$ энтропийного баланса необходимо рассчитывать для каждого альтернативного технико-алгоритмического решения и применять такой вариант данного решения, который обеспечивает минимальное значение $H(XS/D)$ [7–10].

ВЫВОД

При выборе и определении наиболее общих информационных подходов, технологий и характеристик для анализа работы интеллектуальных мехатронных систем учитывалось, что эффективность их функционирования в существенной мере определяется применяемыми информационными технологиями. Поэтому в качестве основополагающего фактора, влияющего на процессы проектирования мехатронной системы с цифровым управлением, рассматривается общность информационных требований с ее интеллектуальными компонентами. Информационным критерием эффективности управления в каждом цикле функционирования интеллектуальной мехатронной системы считается степень соответствия параметров векторов управления результатам идентификации текущих состояний системы. Достижение основного результата при функционировании интеллектуальной мехатронной системы также предлагается оценивать получаемым информационным эффектом. Данный подход позволил выявить основные информационно-технические характеристики интеллектуальных мехатронных систем и определить связи между особенностями структурного построения системы, спецификой объекта управления и правилами выработки управляющих воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулай, А. В. Проектирование интеллектуальных мехатронных систем: информационный кластерный подход / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Информационные технологии в промышленности (ITI'2015): тез. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2–3 апр. 2015 г. Минск, 2015. С. 121–123.
2. Гулай, А. В. Интеллектуальные технологии синтеза стратегических решений при создании сложных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Электроника-инфо. 2014. № 5. С. 24–27.
3. Гулай, А. В. Эвристико-алгоритмические методы в интеллектуальных технологиях проектирования системно-технических комплексов / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Новый университет. 2014. № 2 (24). С. 7–11.

4. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику / У. Р. Эшби. М.: Иностранная лит-ра, 1959. 432 с.
5. Основы технической диагностики / В. В. Карибский [и др.]. М.: Энергия, 1976. 464 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Наука, 1969. 576 с.
7. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. М.: Иностранная лит-ра, 1963. 829 с.
8. Смит, С. Цифровая обработка сигналов / С. Смит; пер. А. Ю. Линович, С. В. Витязев, И. С. Гусинский. М.: ДодЭка-XXI, 2008. 720 с.
9. Феер, К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер; пер. с англ. В. И. Журавлев. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
10. Кларк, Дж. К. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. К. Кларк, Дж. Б. Кейн; пер. с англ. С. И. Гельфанда. М.: Радио и связь, 1987. 391 с.

Поступила 29.09.2015

Подписана в печать 27.11.2015

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2015) Designing of Intellectual Mechatronic Systems: Informative Cluster Approach. *Information Technologies in Industry. ITI'2015. The Eighth International Scientific Conference. April 2–3, 2015, Minsk*. Minsk, UIIP NASB, 121–123 (in Russian).
2. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2014) Intellectual Technologies for Synthesis of Strategic Solutions while Developing Complicated Systems. *Elektronika-Info* [Electronika-Info], (5), 24–27 (in Russian).
3. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2014) Heuristic and Algorithm Methods for Intellectual Technologies on Designing Complex Socio-Technical Systems. *Novy Universitet* [New University], 24 (2), 7–11 (in Russian).
4. Ashby W. R. (1959) *Introduction to Cybernetics*. Moscow, Publishing House "Inostrannaya Literatura". 432 (in Russian).
5. Karibskii V. V., Parkhomenko P. P., Sogomonian E. S., Khalchev V. F. (1976) *Fundamentals of Technical Diagnostics*. Moscow, Energia. 464 (in Russian).
6. Venttsel E. S. (1969) *Theory of Probabilities*. Moscow, Nauka. 576 (in Russian).
7. Shannon K. (1963) *Works on the Theory of Informatics and Cybernetics*. Moscow, Publishing House "Inostrannaya Literatura". 829.
8. Smith S. W. (1997) *Digital Signal Processing. The Scientist and Engineer's Guide*. San Diego, California California Technical Publishing. (Russ. ed.: Smith S. (2008) *Tsifrovaia Obrabotka Signalov*. Moscow, Publishing House "DodEka-XXI". 720).
9. Feher K. (1995) *Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications*. Prentice Hall PTR. 544 (Russ. ed.: Feher K. (2000) *Besprovodnaia Tsifrovaia Sviaz. Metody Modulatsii i Rasshireniiya Spectra*. Moscow, Radio i Svyaz. 520).
10. Clark G. C., Cain J. B. (1981) *Error-Correction Coding for Digital Communications*. New York, Springer US. 422. DOI 10.1007/978-1-4899-2174-1 (Russ. ed.: Clark G. C., Cain J. B. (1987) *Kodirovaniye s Ispravleniem Oshibok v Sistemakh Tsifrovoy Sviazi*. Moscow, Radio i Svyaz. 391).

Received: 29.09.2015

Accepted: 27.11.2015

Published online: 28.07.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-345–352

УДК 681.3.06

Регулярный метод синтеза базовых бент-квадратов произвольного порядка

Канд. техн. наук А. В. Соколов¹⁾¹⁾Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассматриваются вопросы конструирования классов максимально нелинейных булевых бент-функций произвольной длины $N = 2^k$ ($k = 2, 4, 6, \dots$) на основе их спектрального представления – бент-квадратов Агиевича. Данные совершенные алгебраические конструкции являются основой для построения многих криптографических примитивов, таких как генераторы псевдослучайных ключевых последовательностей, криптографические S-блоки подстановки и т. д. Бент-функции находят свое применение для построения C-кодов в системах с кодовым разделением каналов, которые обладают минимально возможным значением пик-фактора $\kappa = 1$, а также для построения систем ортогональных бифазных сигналов и помехоустойчивых кодов. Все многочисленные применения бент-функций связаны с теорией их синтеза. Однако регулярные методы синтеза полных классов бент-функций произвольной длины $N = 2^k$ в настоящее время неизвестны. В статье предложен регулярный метод синтеза базовых бент-квадратов Агиевича произвольного порядка n на основе регулярного оператора диадного сдвига. Выполнена классификация полного множества спектральных векторов длин ($l = 8, 16, \dots$) на основе критерия максимального абсолютного значения и набора абсолютных значений спектральных компонент. Показано, что любой спектральный вектор может быть основой для построения бент-квадрата. Обобщены результаты синтеза бент-квадратов Агиевича порядка $n = 8$, показано, что существуют только три базовых бент-квадрата для данного порядка, тогда как еще пять могут быть получены с помощью операции ступенчато циклического сдвига. Синтезированы все базовые бент-квадраты порядка $n = 16$, позволяющие построение бент-функций длиной $N = 256$. Полученные базовые бент-квадраты могут служить как для непосредственного синтеза бент-функций и их практического использования, так и для проведения дальнейших исследований с целью синтеза новых структур бент-квадратов для порядков $n = 16, 32, 64, \dots$

Ключевые слова: бент-функция, бент-квадрат, преобразование Уолша – Адамара, спектральный вектор

Для цитирования: Соколов, А. В. Регулярный метод синтеза базовых бент-квадратов произвольного порядка / А. В. Соколов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 345–352

Regular Method for Synthesis of Basic Bent-Squares of Random Order

A. V. Sokolov¹⁾¹⁾Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine)

Abstract. The paper is devoted to the class construction of the most non-linear Boolean bent-functions of any length $N = 2^k$ ($k = 2, 4, 6, \dots$), on the basis of their spectral representation – Agievich bent squares. These perfect algebraic constructions are used as a basis to build many new cryptographic primitives, such as generators of pseudo-random key sequences, cryptographic S-boxes, etc. Bent-functions also find their application in the construction of C-codes in the systems with code division multiple access (CDMA) to provide the lowest possible value of Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) $\kappa = 1$, as well as for the construction of error-correcting codes and systems of orthogonal biphasic signals. All the numerous applications of

Адрес для переписки

Соколов Артем Викторович
Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1,
65044, г. Одесса, Украина
Тел.: +38 048 734-85-21
radiosquid@gmail.com

Address for correspondence

Sokolov Artiom V.
Odessa National Polytechnic University
1 Shevchenko Ave.,
65044, г. Odessa, Ukraine
Tel.: +38 048 734-85-21
radiosquid@gmail.com

bent-functions relate to the theory of their synthesis. However, regular methods for complete class synthesis of bent-functions of any length $N = 2^k$ are currently unknown. The paper proposes a regular synthesis method for the basic Agievich bent squares of any order n , based on a regular operator of dyadic shift. Classification for a complete set of spectral vectors of lengths $(l = 8, 16, \dots)$ based on a criterion of the maximum absolute value and set of absolute values of spectral components has been carried out in the paper. It has been shown that any spectral vector can be a basis for building bent squares. Results of the synthesis for the Agievich bent squares of order $n = 8$ have been generalized and it has been revealed that there are only 3 basic bent squares for this order, while the other 5 can be obtained with help the operation of step-cyclic shift. All the basic bent squares of order $n = 16$ have been synthesized that allows to construct the bent-functions of length $N = 256$. The obtained basic bent squares can be used either for direct synthesis of bent-functions and their practical application or for further research in order to synthesize new structures of bent squares of orders $n = 16, 32, 64, \dots$

Keywords: bent-function, bent-square, Walsh – Hadamard transform, spectral vector

For citation: Sokolov A. V. (2016) Regular Method for Synthesis of Basic Bent-Squares of Random Order. *Science & Technique*. 15 (4), 345–352 (in Russian)

Введение

Бент-функции как эталон нелинейности всего множества булевых функций нашли свое применение в виде основных компонентов многих современных систем передачи и обработки информации. Высокие значения нелинейности булевых бент-функций, а значит, их максимальное удаление от множества аффинных функций обуславливают их широкое использование в современных криптографических алгоритмах [1–3]. Равномерность абсолютных значений спектральных коэффициентов Уолша – Адамара делает бент-функции уникальным классом сигналов для применения в системах с технологией кодового разделения каналов (CDMA – Code Division Multiple Access) с точки зрения снижения пик-фактора передаваемых в системе сигналов до минимально возможного уровня $\kappa = 1$ [4]. Булевы бент-функции также находят свои многочисленные применения в теории помехоустойчивого кодирования информации, криптоанализа и других областях науки и техники [1].

Со времени открытия бент-функций О. Ротхаусом [5] сегодня можно говорить о вполне сформировавшейся теории бент-функций [1], которая в последние десятилетия получила стремительное развитие. Тем не менее все еще не существует механизмов построения полных классов этих совершенных алгебраических конструкций для произвольного четного числа переменных k . Принимая во внимание крайне высокую непредсказуемость структуры бент-функций, неизвестно, могут ли такие механизмы быть созданы в принципе. Однако для числа переменных $k = 4$ предложен регулярный метод синтеза полного множества бент-функ-

ций на основе специальных опорных матриц [6], тогда как для числа переменных $k = 6$ предложен метод, основанный на ограниченном переборе в области преобразований Риды – Маллера [7].

Основные положения

Одной из наиболее удачных попыток построения регулярных методов синтеза бент-функций для числа переменных $k = 6$ является предложенный С. Агиевичем метод, основанный на бент-квадратах. Суть его – классификация полного множества бент-функций на подмножества эквивалентных, относящихся к определенному, соответствующему всему подмножеству, опорному бент-квадрату. Все функции внутри подмножества могут быть синтезированы путем применения к опорному бент-квадрату операций перестановок по строкам и столбцам, а также знаковых кодирований.

Цель настоящей статьи – разработка регулярного метода синтеза базовых бент-квадратов любого наперед заданного порядка n . Определение бент-функций через их спектральные коэффициенты заключается в их представлении в виде экспоненциальной таблицы истинности – бент-последовательности.

Определение 1. Бинарная последовательность $B = [b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_{N-1}]$ (где $b_i \in \{\pm 1\}$, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ – коэффициенты) четной длины $N = 2^k = n^2$ ($k = 2, 4, 6, \dots$) называется бент-последовательностью, если она имеет равномерный по модулю спектр Уолша – Адамара $W_B(\omega)$, который представим в матричной форме [1, 6]

$$W_B(\omega) = BA_N, \quad \omega = \overline{0, N-1},$$

где A_N – матрица Уолша – Адамара порядка N , которая строится для каждого следующего порядка 2^{L+1} в соответствии с рекуррентным правилом [1]

$$A_{2^{L+1}} = \begin{bmatrix} A_{2^L} & A_{2^L} \\ A_{2^L} & -A_{2^L} \end{bmatrix}.$$

Исходя из определения бент-функций, каждый спектральный коэффициент бент-последовательности $W_B(\omega=0)$, $W_B(\omega=1)$, ..., $W_B(\omega=N-1)$ принимает значение из множества $\{\pm n\}$, где $n = \sqrt{N}$.

Исследователем С. Агиевичем показано, что для каждой бент-последовательности может быть найден соответствующий бент-квадрат. Бент-квадратом назовем матрицу S порядка n , каждой строкой и каждым столбцом которой является спектральный вектор, полученный в результате умножения сегмента бент-последовательности длины n на матрицу Адамара порядка n [8]

$$S_i = B_i A_n, \quad n = \sqrt{N},$$

где S_i – i -я строка бент-квадрата S ; B_i – i -й сегмент бент-последовательности.

В соответствии с эквивалентностью полного множества бент-квадратов, с точки зрения операций перестановок по строкам и столбцам и операции знакового кодирования, среди всех бент-квадратов могут быть выделены восемь базовых структур порядка $n = 8$ [8]

$$S_1 = \begin{bmatrix} 80000000 \\ 08000000 \\ 00800000 \\ 00080000 \\ 00008000 \\ 00000800 \\ 00000080 \\ 00000008 \end{bmatrix}; \quad S_2 = \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0000 \\ 4 & -4 & 4 & 4 & 0000 \\ 4 & 4 & -4 & 4 & 0000 \\ 4 & 4 & 4 & -4 & 0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0080 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0008 \end{bmatrix};$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & -4 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & -4 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & 4 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}; \quad S_4 = \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 0 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & -4 & 0 & 4 & 0 & 4 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & -4 & 0 & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 4 & 0 & 0 & 4 & -4 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 4 & -4 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & 4 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix};$$

$$S_5 = \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & -4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 4 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & -4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & 4 & -4 \end{bmatrix}; \quad S_6 = \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & -4 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 4 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -4 \end{bmatrix};$$

$$S_7 = \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 0 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & -4 & 0 & 4 & 0 & 4 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & -4 & 0 & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 4 & 0 & -4 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 4 & 0 & 4 & 0 & -4 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 & -4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & 4 & -4 \end{bmatrix}; \quad S_8 = \begin{bmatrix} -6 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & -6 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & -6 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С. Агиевичем также указана возможность построения полного класса бент-последовательностей длины $N = 64$ с помощью операций перестановок по строкам и столбцам и знакового кодирования бент-квадратов (1). Тем не менее методы построения самих бент-квадратов для произвольного порядка n указаны не были.

Для разработки регулярного метода синтеза базовых бент-квадратов рассмотрим классификацию полного множества спектральных векторов. Пусть V_l – линейное векторное пространство векторов v_i , $i = 0, 1, \dots, 2^l - 1$ длины l . Тогда полное множество $J = 2^l$ элементов этого пространства в бинарном виде можно записать

$$V_N = \left\{ \begin{matrix} + & + & + & + & + & + & \dots & + \\ + & + & + & + & + & + & \dots & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ - & - & - & - & - & - & \dots & - \end{matrix} \right\}.$$

Для каждого вектора элемента линейного векторного пространства V_l может быть найден его спектральный вектор путем выполнения преобразования Уолша – Адамара

$$W_i = v_i \cdot A_l.$$

Например, пусть $l = 8$, тогда для вектора элемента линейного векторного пространства V_l $v_{155} = [- - + - - + + -]$ спектральный вектор имеет вид $W_{155} = [-2 \ 2 \ -2 \ -6 \ -2 \ 2 \ -2 \ 2]$.

Определение 2 [9]. Элементарной структурой спектрального вектора W_i назовем набор абсолютных значений его спектральных компонент. Например, рассмотренный выше вектор W_{155} имеет элементарную структуру $\{6(1), 2(7)\}$, где

в круглых скобках указано количество раз, которое встречается приведенная спектральная компонента в спектральном векторе.

Определение 3. Параметр $\gamma = \max\{abs(W_i)\}$ спектрального вектора W_i определяется как его максимальное абсолютное значение. Например, вектор W_{155} имеет максимальное абсолютное значение $\gamma_{\max} = 6$. Установлено, что все множество спектральных векторов W_i для каждого значения N может быть разделено на классы в зависимости от элементарной структуры векторов.

Определение 4. Эквивалентным классом спектральных векторов назовем множество таких векторов $\{W_j\}$, каждый из которых имеет одно и то же значение параметра $\gamma_{\max}$ и состоит из одного и того же набора абсолютных значений спектральных компонент. Так, при $l = 8$ множество векторов W_i , $i = 0, 1, \dots, 2^8 - 1$ разделяется на три эквивалентных класса (табл. 1).

Таблица 1

Классификация полного множества спектральных векторов W_i длины $l = 8$

Classification for complete set of spectral vectors W_i of length $l = 8$

Номер класса спектральных векторов	Значение параметра $\gamma_{\max} = \max\{abs(W_i)\}$	Набор абсолютных значений спектральных компонент	Объем класса
1	8	$\{\pm 8(1), 0(7)\}$	16
2	6	$\{\pm 6(1), \pm 2(7)\}$	128
3	4	$\{\pm 4(4), 0(4)\}$	112

Выберем из каждого класса по одному спектральному вектору, например:

$$W \begin{cases} W_0 = [8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \\ W_{254} = [-6 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]; \\ W_{238} = [-4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \end{cases} \quad (2)$$

Установлено, что на базе каждого из спектральных векторов (2) возможно построение базового бент-квадрата на основе регулярной операции диадного сдвига.

Определение 5. Две бент-функции называются квадратно-эквивалентными, если бент-квадрат одной из них может быть получен из бент-квадрата другой изменением знаков элементов и перестановкой строк и столбцов.

Определение 6. Базовыми (первичными) бент-квадратами назовем такие, которые строятся прямым методом на основе диадного сдвига и не являются эквивалентными.

Определение 7 [10]. Оператор диадного сдвига представим в виде квадратной матрицы порядка n , которая строится по рекуррентному правилу

$$\text{Diad}(n) = \begin{bmatrix} \text{Diad}(n/2); & \text{Diad}(n/2) + n/2; \\ \text{Diad}(n/2) + n/2; & \text{Diad}(n/2), \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{где } \text{Diad}(2) = \begin{bmatrix} 1, 2 \\ 2, 1 \end{bmatrix}.$$

Например, для $n = 8$ в соответствии с (3) получаем

$$\text{Diad}(8) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 2 & 1 & 4 & 3 & 6 & 5 & 8 & 7 \\ 3 & 4 & 1 & 2 & 7 & 8 & 5 & 6 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 8 & 7 & 6 & 5 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 6 & 5 & 8 & 7 & 2 & 1 & 4 & 3 \\ 7 & 8 & 5 & 6 & 3 & 4 & 1 & 2 \\ 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Выполняя с помощью (4) кодирование позиций (индексов) каждого из векторов (2), получаем три базовых бент-квадрата:

$$\begin{aligned} S_1^8 &= \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}; \quad S_2^8 = \begin{bmatrix} -6 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & -6 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & -6 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & -6 \end{bmatrix}; \\ S_3^8 &= \begin{bmatrix} -4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & -4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 4 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & -4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & 4 & -4 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

соответствующих S_1, S_8, S_5 из (1). Остальные базовые по С. Агиевичу бент-квадраты могут быть получены из S_3^8 путем знаковых кодирований, перестановок строк, столбцов, ступенчато циклических сдвигов, суперпозиции с сегментами из S_1^8 [8].

Аналогичным образом все множество спектральных векторов W_i , $i = 0, 1, \dots, 2^{16} - 1$, длины $l = 16$ можно разделить на восемь эквивалентных классов (табл. 2).

Таблица 2

Классификация полного множества спектральных векторов W_i длины $l = 16$ Classification for complete set of spectral vectors W_i of length $l = 16$

Номер класса спектральных векторов	Значение параметра $\gamma_{\max} = \max\{abs(W_i)\}$	Набор абсолютных значений спектральных компонент	Объем класса
1	16	$\{16(1), 0(15)\}$	32
2	14	$\{14(1), 2(15)\}$	512
3	12	$\{12(1), 4(7), 0(8)\}$	3840
4	10	$\{10(1), 6(3), 2(12)\}$	17920
5	8	$\{8(2), 4(8), 0(6)\}$	26880
6	8	$\{8(4), 0(12)\}$	1120
7	6	$\{6(6), 2(10)\}$	14336
8	4	$\{4(16)\}$	896

Из каждого эквивалентного класса выберем по одному спектральному вектору:

$$\begin{aligned}
 W_0 &= [1600000000000000]; \\
 W_{16384} &= [14-22222-2-222-2-2-222]; \\
 W_{257} &= [12-4-4-4-4-4-4-4-400000000]; \\
 W_{49280} &= [1026-26-2-6222-2-2-222]; \\
 W_{54655} &= [-8-8000000-44-44-444-4]; \\
 W_{61166} &= [-8888000000000000]; \\
 W_{63395} &= [-62-622-6-6266-2-2-2-2-2]; \\
 W_{49258} &= [444444-4-4-44-44-444-4].
 \end{aligned} \tag{5}$$

С учетом (3) возможно построить матрицу диадного сдвига для $n = 16$

$$\text{Diad}(16) = \begin{bmatrix}
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\
 2 & 1 & 4 & 3 & 6 & 5 & 8 & 7 & 10 & 9 & 12 & 11 & 14 & 13 & 16 & 15 \\
 3 & 4 & 1 & 2 & 7 & 8 & 5 & 6 & 11 & 12 & 9 & 10 & 15 & 16 & 13 & 14 \\
 4 & 3 & 2 & 1 & 8 & 7 & 6 & 5 & 12 & 11 & 10 & 9 & 16 & 15 & 14 & 13 \\
 5 & 6 & 7 & 8 & 1 & 2 & 3 & 4 & 13 & 14 & 15 & 16 & 9 & 10 & 11 & 12 \\
 6 & 5 & 8 & 7 & 2 & 1 & 4 & 3 & 14 & 13 & 16 & 15 & 10 & 9 & 12 & 11 \\
 7 & 8 & 5 & 6 & 3 & 4 & 1 & 2 & 15 & 16 & 13 & 14 & 11 & 12 & 9 & 10 \\
 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 16 & 15 & 14 & 13 & 12 & 11 & 10 & 9 \\
 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\
 10 & 9 & 12 & 11 & 14 & 3 & 16 & 15 & 2 & 1 & 4 & 3 & 6 & 5 & 8 & 7 \\
 11 & 12 & 9 & 10 & 15 & 16 & 3 & 14 & 3 & 4 & 1 & 2 & 7 & 8 & 5 & 6 \\
 12 & 11 & 10 & 9 & 16 & 15 & 14 & 13 & 4 & 3 & 2 & 1 & 8 & 7 & 6 & 5 \\
 13 & 14 & 15 & 16 & 9 & 10 & 11 & 12 & 5 & 6 & 7 & 8 & 1 & 2 & 3 & 4 \\
 14 & 13 & 16 & 15 & 10 & 9 & 12 & 11 & 6 & 5 & 8 & 7 & 2 & 1 & 4 & 3 \\
 15 & 16 & 13 & 14 & 11 & 2 & 9 & 10 & 7 & 8 & 5 & 6 & 3 & 4 & 1 & 2 \\
 16 & 15 & 14 & 13 & 12 & 1 & 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1
 \end{bmatrix},$$

на основе которой для каждого вектора (5) может быть построен соответствующий ему базовый бент-квадрат

$$\left. \begin{aligned} \mathbb{S}_1^{16} &= W_0(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_2^{16} &= W_{16384}(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_3^{16} &= W_{257}(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_4^{16} &= W_{49280}(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_5^{16} &= W_{54655}(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_6^{16} &= W_{61166}(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_7^{16} &= W_{63395}(\text{Diad}(16)); \\ \mathbb{S}_8^{16} &= W_{49258}(\text{Diad}(16)). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Отметим, что бент-квадрат S_1^{16} представляет собой спектральное отображение конструкции Майорана – МакФарланда [1], которая основана на рекуррентном построении бент-функций на основе перестановок строк и знаковых кодирований матрицы Адамара. Конструкция S_1^{16} нашла свое применение также и для построения криптографических высоконелинейных S -блоков подстановки, которые соответствуют строгому лавинному критерию [11, 12].

Для краткости приведем пример построенного бент-квадрата в виде структуры $\mathbb{S}_3^{16}$:

[illegible]

для которой путем ее матричного произведения над алфавитом $\{\pm 1\}$ с матрицей Адамара A_{16} порядка $n = 16$ (двумерного преобразования Уолша – Адамара) и последующей конкатенации строк результирующей матрицы получаем бент-последовательность длины $N = 256$

$$B_3 = \text{sign}(\mathbb{S}_3^{16} A_{16}) = \begin{bmatrix} - & + & + & + & + & + & + & - & + & + & + & + & + & - & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + \\ - & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & + & + & - & - & + & - & + & - & - & + & - & + & - & + \\ - & + & + & + & - & - & - & + & + & - & - & - & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & + \\ - & + & - & - & - & + & + & - & + & - & - & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + \\ - & + & + & + & + & + & + & + & - & - & - & - & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + \\ - & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - & + \\ - & + & + & + & - & - & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & + & + & - & - & + & - & - & + \\ - & + & - & - & - & + & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & + & + & - & - & + & - & - & + \\ - & + & + & + & - & - & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & + & + & - & - & + & - & - & + \\ - & + & - & - & - & + & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & + & + & - & - & + & - & - & + \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим также бент-квадрат S_7^{16} из (6)

$$\mathbb{S}_7^{16} = \begin{bmatrix} -6 & 2 & -6 & 2 & 2 & -6 & -6 & 2 & 6 & 6 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ 2 & -6 & 2 & -6 & -6 & 2 & 2 & -6 & 6 & 6 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & 2 & -6 & -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 & -2 \\ 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & -6 & 2 & -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 & -2 \\ 2 & -6 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 \\ -6 & 2 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 \\ -6 & 2 & 2 & -6 & -6 & 2 & -6 & 2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 \\ 2 & -6 & -6 & 2 & 2 & -6 & 2 & -6 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -6 & 2 & -6 & 2 & 2 & -6 & -6 & 2 \\ 6 & 6 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 2 & -6 & 2 & -6 & -6 & 2 & 2 & -6 \\ -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 & -2 & -2 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & 2 & -6 \\ -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 & -2 & -2 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & -6 & 2 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 & 2 & -6 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 & -2 & -2 & -6 & 2 & 2 & -6 & 2 & -6 & 2 & -6 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 & -6 & 2 & 2 & -6 & -6 & 2 & -6 & 2 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 6 & 6 & 2 & -6 & -6 & 2 & 2 & -6 & 2 & -6 \end{bmatrix},$$

для которого бент-последовательность имеет вид

$$B_7 = \begin{bmatrix} - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \\ - & - & + & + & + & - & + & - & - & - & + & - & - & - & + & + & + & + & + & - & + & - & - & + & - & + \end{bmatrix}.$$

Отметим, что на основе построенных базовых бент-квадратов $S_1^{16}, \dots, S_8^{16}$ путем применения операций ступенчато циклического сдвига по строкам, суперпозиции сегментов $S_1^{16}, \dots, S_8^{16}$, операций циклических сдвигов по строкам и столбцам, а также знаковых кодирований может быть получено множество бент-квадратов порядка $n = 16$ и соответственно множество бент-функций длины $N = 256$. Тем не менее разработка регулярных правил построения новых бент-квадратов на основе базовых представляется важной, но все еще нерешенной задачей теории бент-функций.

ВЫВОДЫ

1. Разработан регулярный метод синтеза бент-квадратов С. Агиевича на основе операции диадного сдвига, позволяющий синтезировать базовые бент-квадраты любого порядка n .

2. Дальнейшее развитие получил метод синтеза бент-функций на основе бент-квадратов Агиевича, в рамках чего синтезирован полный класс из восьми базовых бент-квадратов порядка $n = 16$.

3. Предложена классификация полного множества спектральных векторов длины $l = 8, 16$ на основе критерия максимального абсолютного значения и набора абсолютных значений спектральных компонент, что позволило разделить все множество спектральных коэффициентов на эквивалентные классы.

4. Предложенный регулярный метод синтеза базовых бент-квадратов на основе оператора диадного сдвига позволяет расширить область применения метода синтеза бент-функций на основе бент-квадратов Агиевича на большие их длины N , что является необходимым для современных информационных технологий, использующих бент-функции для своего функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токарева, Н. Н. Бент-функции: результаты и приложения: обзор работ / Н. Н. Токарева // Прикладная дискретная математика. 2009. № 1 (3). С. 15–37.
2. Мазурков, М. И. Генератор ключевых последовательностей на основе дуальных пар бент-функций / М. И. Мазурков, Н. А. Барабанов, А. В. Соколов // Труды Одесского политехнического университета. 2013. № 3 (42). С. 150–156.
3. Соколов, А. В. Быстродействующий генератор ключевых последовательностей на основе клеточных автоматов / А. В. Соколов // Праці Одес. політехн. ун-ту. 2014. № 1 (43). С. 180–186.
4. Paterson, K. G. Sequences for OFDM and Multi-Code CDMA: Two Problems in Algebraic Coding Theory // Sequences and their Applications. Seta 2001. Second Int. Conference (Bergen, Norway, May 13–17, 2001). Proc. Berlin: Springer, 2002. P. 46–71.
5. Rothaus, O. S. On “Bent” Functions / O. S. Rothaus // Journal of Combinatorial Theory, Series A. 1976. Vol. 20 No 3. P. 300–305.
6. Мазурков, М. И. Регулярные правила построения полного класса бент-последовательностей длины 16 / М. И. Мазурков, А. В. Соколов // Праці Одес. політехн. ун-ту. 2013. № 2 (41). С. 231–237.
7. Meng, Qingshu. A Novel Algorithm Enumerating Bent Functions / Q. Meng [et al.] // Discrete Mathematics. 2008. Vol. 308, Iss. 23. P. 5576–5584.
8. Agievich, S. V. On the Representation of Bent Functions by Bent Rectangles / S. V. Agievich // Probabilistic Methods in Discrete Mathematics: Proceedings of the Fifth International Petrozavodsk Conference (Petrozavodsk, June 1–6, 2000). Utrecht, Boston: VSP, 2002. P. 121–135.
9. Соколов, А. В. Алгоритм устранения спектральной эквивалентности компонентных булевых функций S-блоков конструкции Нибера / А. В. Соколов, Н. А. Барабанов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2015. Т. 58, № 5. С. 41–49.
10. Мазурков, М. И. Быстрые ортогональные преобразования на основе бент-последовательностей / М. И. Мазурков, А. В. Соколов // Информатика та математичні методи в моделюванні. 2014. № 1. С. 5–13.
11. Соколов, А. В. Новые методы синтеза нелинейных преобразований современных шифров / А. В. Соколов. Германия: Lap Lambert Academic Publishing, 2015. 100 с.
12. Соколов, А. В. Конструктивный метод синтеза нелинейных S-блоков подстановки, соответствующих строгому лавинному критерию / А. В. Соколов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2013. Т. 56, № 8. С. 43–52.

Поступила 14.09.2015

Подписана в печать 17.11.2015

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Tokareva N. N. (2009) Bent-Functions: Results and Applications. Review of Papers. *Prikladnaia Diskretnaia Matematika* [Applied Discrete Mathematics], 3 (1), 15–37 (in Russian).
2. Mazurkov M. I., Barabanov N. A., Sokolov A. V. (2013) Generator of Key Length on the Basis of Bent-Function Dual Pairs. *Pratsi Odes. Politekh. Un-tu* [Proceedings of Odessa Polytechnical University], 42 (3), 150–156 (in Russian).
3. Sokolov A. V. (2014) Fast-Acting Generator of Key Length on the Basis of Cellular Automaton. *Pratsi Odes. Politekh. Un-tu* [Proceedings of Odessa National Polytechnical University], 43 (1), 180–186 (in Russian).
4. Paterson K. G. (2002) Sequences for OFDM and Multi-Code CDMA: Two Problems in Algebraic Coding Theory. *Proc. SETA 2001 (Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science Series)*. Berlin, Springer, 46–71.
5. Rothaus O. S. (1976) On “Bent” Functions. *Journal of Combinatorial Theory, Series A*. 20 (3), 300–305 DOI: 10.1016/0097-3165(76)90024-8
6. Mazurkov M. I., Sokolov A. V. (2013) Regular Rules for Development of Complete Class of Bent-Sequential Length 16. *Pratsi Odes. Politekh. Un-tu* [Proceedings of Odessa Polytechnical University], 41 (2), 231–237 (in Russian).
7. Qingshu Menga, Min Yangb, Huanguo Zhanga, Jingsong Cuia (2008) A Novel Algorithm Enumerating Bent Functions. *Discrete Mathematics*, 308 (23), 5576–5584 DOI: 10.1016/j.disc.2007.10.024.
8. Agievich S. V. (2002) On the Representation of Bent Functions by Bent Rectangles. *Probabilistic Methods in Discrete Mathematics: Proceedings of the Fifth International Petrozavodsk Conference (Petrozavodsk, June 1–6, 2000)*. Boston: VSP, 121–135.
9. Sokolov A. V., Barabanov N. A. (2015) Algorithm for Removing the Spectral Equivalence of Component Boolean functions of Nyberg-Design S-Boxes. *Radioelectronics and Communications Systems*, 58 (5), 220–227. DOI: 10.3103/S0735272715050040.
10. Mazurkov M. I., Sokolov A. V. (2014) Fast Orthogonal Transformations on the Basis of Bent Sequences. *Informatika ta Matematichni Metodi v Modeliuvanni* [Informatics and Mathematical Methods in Simulation], (1), 5–13 (in Russian).
11. Sokolov A. V. (2015) *New Methods for Synthesis of Non-Linear Transformations in Modern Codes*. Germany, Lap Lambert Academic Publishing. 100.
12. Sokolov A. V. (2013) Constructive Method for the Synthesis of Nonlinear S-Boxes Satisfying the Strict Avalanche Criterion. *Radioelectronics and Communications Systems*, 56 (8), 415–423. DOI: 10.3103/S0735272713080049.

Received: 14.09.2015

Accepted: 17.11.2015

Published online: 28.07.2016